

O TEMPO DE REVERBERAÇÃO E A INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Caso de Estudo: Salas de aula da FEUP

CARLOS MIGUEL FERREIRA E SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais, Irmão e Família

Não encontre defeitos, encontre soluções.

Qualquer um sabe queixar-se.

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho desejo mostrar toda a minha gratidão a todos aqueles que tornaram possível a sua realização, salientando um especial apreço:

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela paciência, a orientação, a ajuda e os conselhos prestados sempre que necessário.

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa pela amizade, e principalmente pelo apoio prestado durante as medições do caso de estudo e conselhos fornecidos.

Aos Engenheiros Hélder José Silveira Gonçalves e Luísa Maia Mota Garcia pelo fornecimento de orientações para possíveis materiais a utilizar para a correção acústica utilizada.

Aos Engenheiros Alexandre Eitner e Alberto Aragão, da empresa S.T.I.E.R. Lda pelo rápido fornecimento das características e preços dos vários materiais aqui apresentados.

Não podia também deixar de agradecer aos meus pais por tornarem possível a realização deste curso e por me apoiarem incondicionalmente em todos os momentos.

E finalmente aos meus amigos pelo companheirismo, amizade, paciência e apoio.

RESUMO

O presente trabalho destina-se a estudar o efeito do tempo de reverberação na inteligibilidade da palavra em salas de aula.

A importância da existência de boas condições acústicas em salas de aula tem sido alvo de vários estudos ao longo dos anos. São aqui expressos alguns dos problemas que existem devido à falta de condições acústicas adequadas para o ensino.

A forma de avaliar e caracterizar as condições acústicas de salas de aula relativamente à inteligibilidade da palavra assenta sobre a medição de vários parâmetros acústicos, sendo os de maior importância para o caso em estudo: o “Tempo de Reverberação” e o “*Rapid Speech Transmission Index*”, que são aqui apresentados.

Uma das principais causas de fracas condições acústicas em salas de aula é a existência de valores de tempos de reverberação inadequados, prejudicando bastante a inteligibilidade da palavra. Desta forma, será esta a característica mais evidenciada na influência da inteligibilidade da palavra.

Com este estudo e a análise de estudos realizados por outros autores, valores ideais dos tempos de reverberação são apresentados e comparados com diversos valores legislativos nacionais e internacionais atualmente em vigor.

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto foi alvo de estudo, sendo analisada as condições acústicas das suas salas de aulas e comparados os resultados obtidos com os valores de referência ideais apresentados e legislativos diversos.

Com a realização deste trabalho, possíveis regras de projeto são expostas, por forma a garantir ou melhorar as condições acústicas em salas de aulas relativamente à inteligibilidade da palavra, tornando possível às palavras aí proferidas serem compreendidas com clareza por parte de todos os ouvintes.

Todo este trabalho poderá ser utilizado como base mínima para os profissionais responsáveis pelo aspeto interior de salas (tais como arquitetos, *designers* de interiores, etc.). Estes profissionais tendem a optar por criar salas agradáveis ao olhar mas menos agradáveis para o ouvido. Desta forma, estes profissionais terão, à partida, algumas guias para a criação de salas visualmente e auditivamente satisfatórias. Sendo no entanto indispensável a presença de um profissional de acústica para uma análise mais detalhada de cada.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Inteligibilidade de palavra, Tempo de reverberação, RASTI, Salas de aulas.

ABSTRACT

The present work aims to study the effect of reverberation time in speech intelligibility in classrooms.

The importance of good acoustical conditions in classrooms has been the subject of several studies over the years. Expressed here are some of the problems that exist due to lack of adequate acoustic conditions for teaching.

The way to evaluate and characterize the acoustic conditions in classrooms regarding speech intelligibility is based on the measurement of various acoustic parameters, being the most important: "Reverberation Time" and "Rapid Speech Transmission Index "which are presented here.

One of the main causes of poor acoustic conditions in classrooms is the existence of inadequate values of reverberation time, undermining speech intelligibility. Thus, this feature is more evident in the influence of speech intelligibility.

Using this study and analysis of studies by other authors, optimal values of reverberation times are presented and compared with several national and international legislative values.

The Faculty of Engineering, University of Porto was the target of study, analyzed the acoustic conditions of its classrooms and the results are compared with optimal reference values and legislative limits.

Possible design rules are exposed, in order to ensure or improve the acoustic conditions in classrooms on speech intelligibility, making it possible to the words to be clearly understood by all listeners.

This work can be used as a minimum basis for professionals responsible for the interior appearance of the rooms (such as architects, interior designers, etc.). These professionals tend to choose to create rooms pleasant to look at but less pleasing to the ear. Thus, these professionals can have, some guides for creating rooms visually and aurally satisfying. It is however indispensable the presence of an acoustics professional for a more detailed analysis of each case.

KEYWORDS: Acoustics, Speech intelligibility, Reverberation time, RASTI, Classrooms.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XIII
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XVII

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS 1

1.2. ESTRUTURA DA TESE..... 2

2. CONCEITOS ACÚSTICOS 3

2.1. CONCEITOS BÁSICOS 3

2.1.1. SOM / RUÍDO 3

2.1.2. INTENSIDADE SONORA..... 4

2.1.3. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA..... 6

2.1.4. FREQUÊNCIA SONORA..... 8

2.2. ABSORÇÃO SONORA 12

2.2.1. CONCEITO..... 12

2.2.2. MATERIAIS ABSORVENTES 13

2.2.2.1. Tipos de materiais absorventes 13

2.2.2.2. Materiais porosos e fibrosos 13

2.2.2.3. Ressonadores 14

2.2.2.4. Membranas 15

2.2.2.5. Absorção do ar 16

2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO 16

2.3.1. CONCEITO..... 16

2.3.2. FÓRMULA DE SABINE 18

2.3.3. FÓRMULA DE EYRING..... 18

2.3.4. FÓRMULA DE MILLINGTON-SETTE 19

2.3.5. OUTRAS FÓRMULAS..... 19

2.4. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA 20

2.4.1. CONCEITOS	20
2.4.2. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	22
2.4.2.1. Índice de articulação (AI).....	22
2.4.2.2. <i>Speech intelligibility index</i> (SII).....	25
2.4.2.3. <i>Speech interference level</i> (SIL)	28
2.4.2.4. <i>Rapid speech transmission index</i> (RASTI).....	30

3. NECESSIDADE DE BOAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS NAS ESCOLAS	33
3.1. IMPORTÂNCIA GERAL.....	33
3.2. IMPORTÂNCIA PARA O ALUNO	34
3.3. IMPORTÂNCIA PARA O PROFESSOR.....	34

4. RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE REVERBERAÇÃO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA.....	37
--	-----------

5. VALORES DE REFERÊNCIA.....	45
5.1. LEGISLAÇÃO	45
5.1.1. PORTUGAL	45
5.1.2. OUTROS PAÍSES	47
5.2. VALORES IDEAIS	51

6. CASO DE ESTUDO	53
6.1. CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS.....	53
6.2. METODOLOGIA.....	56
6.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS	56
6.2.2. METODOLOGIA DO TRABALHO	56
6.3. RESULTADOS	58
6.3.1. SALA B 002.....	58
6.3.2. SALA B 018.....	59
6.3.3. SALA B 023.....	60
6.3.4. SALA B 027.....	61
6.3.5. SALA B 032.....	62
6.3.6. SALA B 221.....	63

6.3.7. SALA B 333	64
6.3.8. SALA B 334	65
6.3.9. ANÁLISE GLOBAL	66
6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
7. SUGESTÃO DE MELHORIA	73
7.1. METODOLOGIA DA PROPOSTA DE MELHORIA	73
7.2. MATERIAIS PROPOSTOS	74
7.3. ANÁLISE DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS	77
7.3.1. SALA B 002	77
7.3.2. SALA B 018	78
7.3.3. SALA B 023	79
7.3.4. SALA B 027	80
7.3.5. SALA B 221	81
7.3.6. SALA B 333	82
7.3.7. SALA B 334	83
7.3.8. RESUMO DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS	84
8. REGRAS DE PROJETO	85
8.1. GENERALIDADES	85
8.2. MÉTODO A UTILIZAR	85
8.3. MÉTODO SIMPLIFICADO / REGRAS BÁSICAS	89
9. CONCLUSÃO	95
9.1. CONCLUSÕES GERAIS	95
9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema tridimensional da propagação de uma onda.....	4
Figura 2.2 – Amplitude da onda sonora [3].	6
Figura 2.3 – Esquema do RMS [6].	8
Figura 2.4 – Onda sonora pura (cima) e onda sonora composta (baixo) [7].	8
Figura 2.5 – Gama de frequência ouvida por vários animais [9].	9
Figura 2.6 – Espectrograma realizado com programa DSSF3 [10].	10
Figura 2.7 – Curvas de igual sensibilidade auditiva segundo ISO 226 [11].	11
Figura 2.8 – Curvas de ponderação (filtros) [12].	11
Figura 2.9 – Formas de energia sonora [12].	12
Figura 2.10 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais absorventes [adaptada de [1]].	13
Figura 2.11 – Materiais porosos e fibrosos.	14
Figura 2.12 – Ressonador Agrupado. Placa perfurada em teto suspenso [15].	15
Figura 2.13 – Membrana ressonante [16].	16
Figura 2.14 – Ondas e reflexões numa sala [adaptado de [17]].	17
Figura 2.15 – Decaimento do tempo de reverberação [18].	17
Figura 2.16 – Espectrograma da palavra “sábado” realizado com programa DSSF3 [10].	21
Figura 2.17 – Emissão da voz no plano horizontal (A) e vertical (B) para as baixas e médias frequências [21].	22
Figura 2.18 – Tabela para cálculo de SII pelo método de 1/3 de oitava [23].	26
Figura 2.19 – Tabela para cálculo de SII pelo método de 1/1 de oitava [23].	27
Figura 2.20 – Valores de SIL (dB) para o qual a comunicação é no limite possível para quatro níveis de esforço de voz [Adaptado de [1]].	29
Figura 2.21 – Transmissor RASTI Brüel & Kjær 4225 [Fotografia do autor].	31
Figura 2.22 – Recetor RASTI Brüel & Kjær 4419 [Fotografia do Autor].	31
Figura 4.1 – Efeito do tempo de reverberação na palavra <i>back</i> [18].	38
Figura 4.2 – Valores de STI em função do TR para uma sala de aula com 300 m ³ [32].	41
Figura 4.3 – Exemplo de salas de aula temporárias referentes à norma ANSI/ASA S12.60-2009/Part 2 [36].	43
Figura 6.1 – Planta da FEUP na data da sua construção [51].	53
Figura 6.2 – Sonómetro Brüel & Kjær 2260 [Fotografia do autor].	56
Figura 6.3 – Emissor Brüel & Kjær 4224 [Fotografia do autor]	56

Figura 6.4 – Posicionamento dos aparelhos para medição do TR, sendo F a posição do emissor e os números de 1 a 3 as várias posições do sonómetro.	57
Figura 6.5 – Posicionamento tipo dos aparelhos para medição do RASTI, sendo F a posição do emissor e os números de 1 a 6 as várias posições do recetor.	57
Figura 6.6 – Resumo do TR médio (500 a 2k Hz) das oito salas medidas.	66
Figura 6.7 – Resumo do RASTI médio das oito salas medidas.	66
Figura 8.1 – Área de material absorvente mínimo necessário a colocar no teto em função do volume da sala e do coeficiente de absorção do material absorvente para obter $TR = 0,7$ s.	92
Figura 8.2 – Área de material absorvente mínimo necessário a colocar no teto em função do volume da sala e do coeficiente de absorção do material absorvente para obter $TR = 0,5$ s.	92
Figura 8.3 – Coeficientes de absorção mínimos a utilizar dependendo da área de material absorvente a aplicar e do volume para obter um $TR = 0,7$ s.	93
Figura 8.4 – Coeficientes de absorção mínimos a utilizar dependendo da área de material absorvente a aplicar e do volume para obter um $TR = 0,5$ s.	94

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Velocidade de propagação do som em diversos materiais [2].	5
Quadro 2.2 – Exemplos de pressões, intensidades e níveis de pressão sonora [5].	7
Quadro 2.3 – Absorção sonora do ar (m^{-1}) [1].	16
Quadro 2.4 – Exemplos de valores de γ^2 [1].	20
Quadro 2.5 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1].	22
Quadro 2.6 – Nível de conversação por frequência [22].	23
Quadro 2.7 – Fatores de ponderação por frequência [22].	24
Quadro 2.8 – Exemplo de quadro para obtenção do parâmetro AI [1].	25
Quadro 2.9 – Perceção subjetiva para a inteligibilidade e privacidade da palavra de acordo com o parâmetro AI [1].	25
Quadro 2.10 – Perceção subjetiva para a inteligibilidade da palavra de acordo com o parâmetro SII [23].	26
Quadro 2.11 – Valores de SIL (dB) para o qual a comunicação é no limite possível, sendo M – Masculino e F – Feminino [1].	29
Quadro 2.12 – Classificação RASTI [24].	31
Quadro 4.1 – Tempos de reverberação ótimos em função do volume [Adaptado de [31]].	39
Quadro 4.2 – Tempos de reverberação satisfatórios para o pior caso possível de r_s [adaptado de [31]].	40
Quadro 4.3 – TR ótimo segundo Bistafa e Bradley [adaptado de [32]].	41
Quadro 4.4 – TR para o qual a inteligibilidade é de 100% [adaptado de [32]].	42
Quadro 4.5 – Resumo do TR máximos recomendáveis segundo vários autores.	44
Quadro 5.1 – Valores limite mínimos de $D_{nT,w}$, entre locais do edifício, segundo o RRAE [44].	46
Quadro 5.2 – Tempo de reverberação, segundo o RRAE [44].	46
Quadro 5.3 – Níveis de $L_{Ar,nT}$ limite, segundo o RRAE [44].	47
Quadro 5.4 – Tempo de reverberação, segundo legislação espanhola DB-HR [45].	48
Quadro 5.5 – Tempo de reverberação, segundo decreto francês de 25 de Abril de 2003 [46].	48
Quadro 5.6 – Tempo de reverberação, segundo norma sueca SS 25268 [adaptado de [47]].	49
Quadro 5.7 – Tempo de reverberação, segundo norma inglesa BB 93 [adaptado de [48]].	49
Quadro 5.8 – Tempo de reverberação máximos nas frequências médias de 125 Hz a 2 kHz, segundo norma norueguesa antiga e nova [adaptado de [49] e [50]].	50
Quadro 5.9 – Resumo de limites legislativos e normas de vários países	51
Quadro 6.1 – Descrição das várias salas em estudo na FEUP.	54
Quadro 6.2 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 002.	58

Quadro 6.3 – Resultados do RASTI para a sala B 002.....	58
Quadro 6.4 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 018.	59
Quadro 6.5 – Resultados do RASTI para a sala B 018.....	59
Quadro 6.6 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 023.	60
Quadro 6.7 – Resultados do RASTI para a sala B 023.....	60
Quadro 6.8 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 027.	61
Quadro 6.9 – Resultados do RASTI para a sala B 027.....	61
Quadro 6.10 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 032.	62
Quadro 6.11 – Resultados do RASTI para a sala B 032.....	62
Quadro 6.12 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 221.	63
Quadro 6.13 – Resultados do RASTI para a sala B 221.....	63
Quadro 6.14 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 333.	64
Quadro 6.15 – Resultados do RASTI para a sala B 333.....	64
Quadro 6.16 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 334.	65
Quadro 6.17 – Resultados do RASTI para a sala B 334.....	65
Quadro 6.18 – Classificação subjetiva da inteligibilidade da palavra para as várias salas em estudo.67	
Quadro 6.19 – Relação entre TR médio obtido para frequências de 500, 1000 e 2000 Hz e os valores de RASTI.....	68
Quadro 6.20 – Relação entre TR médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz e os volumes das salas.....	68
Quadro 6.21 – Relação entre RASTI médio e os respetivos volumes.	69
Quadro 6.22 – Resumo das equações encontradas.....	69
Quadro 6.23 – Comparação entre sala acusticamente tratada (B 032) e sala sem tratamento (B 023) com idêntico volume.....	69
Quadro 6.24 – Avaliação do TR das salas da FEUP com diversas legislações.	70
Quadro 7.1 – Resumo dos materiais propostos e respetivos preços [56].....	76
Quadro 7.2 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 002 para produzir um TR de 0,7 s.....	77
Quadro 7.3 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 002 e respetivo custo aproximado.....	77
Quadro 7.4 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 018 para produzir um TR de 0,7 s.....	78
Quadro 7.5 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 018 e respetivo custo aproximado.....	78
Quadro 7.6 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 023 para produzir um TR de 0,7 s.....	79
Quadro 7.7 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 023 e respetivo custo aproximado.....	79
Quadro 7.8 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 027 para produzir um TR de 0,7 s.....	80
Quadro 7.9 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 027 e respetivo custo aproximado.....	80

Quadro 7.10 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 221 para produzir um TR de 0,7 s.....	81
Quadro 7.11 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 221 e respetivo custo aproximado. ...	81
Quadro 7.12 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 333 para produzir um TR de 0,7 s.....	82
Quadro 7.13 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 333 e respetivo custo aproximado. ...	82
Quadro 7.14 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 334 para produzir um TR de 0,7 s.....	83
Quadro 7.15 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 334 e respetivo custo aproximado. ...	83
Quadro 7.16 – Resumo de material necessário para corrigir acusticamente todo o bloco B e respetivo custo aproximado.....	84
Quadro 8.1 – Valores de referência de coeficientes de absorção sonora de alguns materiais [adaptado de [57]].	86

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

- α – Coeficiente de absorção sonora
- $\bar{\alpha}$ – Coeficiente de absorção sonora médio
- ρ – Massa volúmica do material [kg/m^3]
- θ – Temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$]
- $^{\circ}\text{C}$ – Grau celsius (unidade de medida)
- A – Absorção sonora do material [m^2]
- AI – Índice de articulação
- ATL – Atividades de Tempos Livres
- AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado
- c – Celeridade [m/s]
- d – Largura da caixa-de-ar [cm]
- D – Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea [dB]
- dB – Decibel (unidade de medida)
- e – Espessura da placa perfurada [cm]
- f_0 – Frequência da banda [Hz]
- f_1 – Limite inferior da banda f_0 [Hz]
- f_2 – Limite superior da banda f_0 [Hz]
- FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- HR – Humidade relativa
- Hz – Hertz (unidade de medida)
- I – Intensidade sonora [W/m^2]
- l – Comprimento do “gargalo” [m]
- L – Nível de pressão sonora [dB]
- Comprimento do compartimento [m]
- L' – Isolamento sonoro a ruídos de percussão [dB]
- L_p – Nível de pressão sonora [dB]
- m – Coeficiente de absorção sonora do ar [m^{-1}]
- Índice de modelação
- m^3 – Metro cúbico (unidade de medida)
- ms – Milésimos de segundo (unidade de medida)
- MTF – *Modulation Transfer Function*

nc – Nível de conversação

p – Pressão sonora [Pa]

– Variação de pressão

P – Percentagem de área perfurada [%]

p_0 – Pressão sonora de referência [2×10^{-5} Pa]

Pa – Pascal (unidade de medida)

r – Distância à fonte [m]

– Raio do orifício [m]

– Raio de cada furação

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RF – Ruído de fundo

RMS – *Root Mean Square*

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

s – Segundos (unidade de medida)

S – Área da superfície do material em contacto com o ar [m^2]

– Área do orifício [m^2]

SII – *Speech intelligibility index*

SIL – *Speech Interference Level*

STI – *Speech Transmission Index*

TR – Tempo de reverberação [s]

TR_{20} – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 20 dB [s]

TR_{30} – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 30 dB [s]

TR_{60} – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 60 dB [s]

V – Volume da cavidade [m^3]

– Volume do espaço [m^3]

W – Potência sonora [W]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS

Ao longo do quotidiano, todos os seres humanos estão constantemente e até sem que se apercebam a receber elevadas quantidades de ruído. Todos estes ruídos podem causar vários problemas de saúde quando expostos a eles durante demasiado tempo ou de intensidade elevada.

A Acústica é a ciência que estuda todos estes ruídos, e é com recurso a esta ciência que este trabalho foi elaborado.

Nas escolas, existe constantemente ruídos de crianças a gritar, bolas a bater, conversas nos corredores, ruído das instalações de AVAC, entre muitos outros em função da idade dos alunos. Mas, uma sala de aula é um local onde todos os alunos deveriam ter condições acústicas especiais, ou seja, deveria ser um local sossegado onde os estudantes poderiam aprender sem a presença de ruídos perturbadores. No entanto, não são apenas os ruídos provenientes do exterior que afetam a qualidade acústica de uma sala de aula. O aspeto acusticamente mais importante é a inteligibilidade da palavra, ou seja, a qualidade das palavras ouvidas que pode ser afetada pelos ruídos exteriores ou interiores e por condições desadequadas da sala.

A aprendizagem é claramente um dos momentos mais importantes das vidas humanas, e nas escolas esta aprendizagem baseia-se no passar de informação do docente para o aluno. Hoje em dia, esta informação ainda é enviada oralmente o que provoca erros quando a informação não é recebida na sua melhor qualidade. Mas porque é que a informação não chega sempre aos alunos sem erros?

O principal problema das informações chegarem com erros é as fracas condições acústicas da sala, o que faz com que os alunos não percebam a totalidade das palavras. E quando tal acontece, o aluno pode ficar com uma ideia completamente errada da informação, podendo ficar seriamente comprometido o seu sucesso escolar.

Desta forma torna-se imprescindível que as salas tenham qualidades acústicas adequadas para o ensino. Escolas de música apresentam já vários cuidados acústicos. Algumas escolas até já possuem salas acusticamente tratadas exclusivamente para alunos com capacidades auditivas abaixo do normal, mas é necessário existir condições acústicas em todas as salas. O tempo de reverberação é uma das mais importantes características acústicas das salas de aulas, pois influencia bastante na inteligibilidade da palavra e é sobre este assunto que se prende este trabalho.

Vários estudos foram realizados em relação a este problema e já vários países, tais como a Bélgica, França, Suécia, Suíça, Reino Unido, Portugal, entre outros, apresentam legislação com valores de referência para tempos de reverberação a utilizar em salas de aulas.

Com este trabalho pretende-se analisar esta problemática do tempo de reverberação a utilizar em salas de aulas e comparar com diversas legislações atualmente em vigor, sendo desta forma possível indicar possíveis regras de projeto a seguir.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho divide-se em nove capítulos distintos, sendo eles: o Capítulo 1 referente a uma pequena introdução; no Capítulo 2 são descritos vários conceitos acústicos para melhor compreensão do tema; no Capítulo 3 apresenta-se breves razões para que sejam implementadas boas condições acústicas nas escolas; no Capítulo 4 pretende-se relacionar o tempo de reverberação com a inteligibilidade da palavra, sendo aqui apresentada a sua influência; no Capítulo 5 são indicados os valores ideais a utilizar e comparado com valores legislativos nacionais e internacionais; no Capítulo 6 é apresentado o caso de estudo, ou seja, os procedimentos, as medições realizadas e os resultados obtidos; no Capítulo 7 são apresentadas soluções de melhoria ao caso de estudo realizado; no Capítulo 8 indicam-se possíveis regras de projeto a utilizar por forma a garantir bons tempos de reverberação; no Capítulo 9 apresenta-se uma conclusão do trabalho e pistas para possíveis desenvolvimentos futuros.

2

CONCEITOS ACÚSTICOS

2.1. CONCEITOS BÁSICOS

2.1.1. SOM / RUÍDO

O ser humano sabe o que é um Som ou Ruído. Mas o que é isso cientificamente?

O som ou ruído não é mais do que uma ligeira variação de pressão no ar captada por um sistema auditivo. Uma variação de pressão no ar só pode ser considerado um som ou ruído se existir nessa altura algum ser vivo, com um sistema auditivo, capaz de a perceber.

A diferença entre som e ruído é bastante simples. Som é uma variação de pressão agradável ou com significado para o ouvinte, captada pelo sistema auditivo, algo que é suposto ser ouvido, como por exemplo a campainha de casa, o telemóvel a tocar, o familiar a chamar. Um ruído é também uma variação de pressão captada pelo sistema auditivo mas desagradável ou inútil para o ouvinte, como por exemplo a campainha do vizinho a tocar, o toque do telemóvel de um colega numa sala de aula, um carro a passar na rua.

Desta forma compreende-se que uma pequena variação de pressão pode ser algo positivo para determinadas pessoas (som), mas ao mesmo tempo algo negativo para muitas outras (ruído).

O som propaga-se como uma onda longitudinal em relação a um centro esférico do ponto onde se deu a variação de pressão inicial (Figura 2.1) [1]. Esta propagação existe em meios sólidos, líquidos ou gasosos e é normalmente analisado por oscilogramas ou espectrogramas.

O som é principalmente caracterizado pelo seu nível de pressão sonora e pela frequência.

O nível de pressão sonora caracteriza se o som ouvido é mais ou menos intenso e é medido em decibel (dB).

A frequência define se o som é mais grave ou mais agudo e é medido em hertz (Hz), sendo os valores baixos correspondentes a sons graves e os valores elevados a sons agudos.

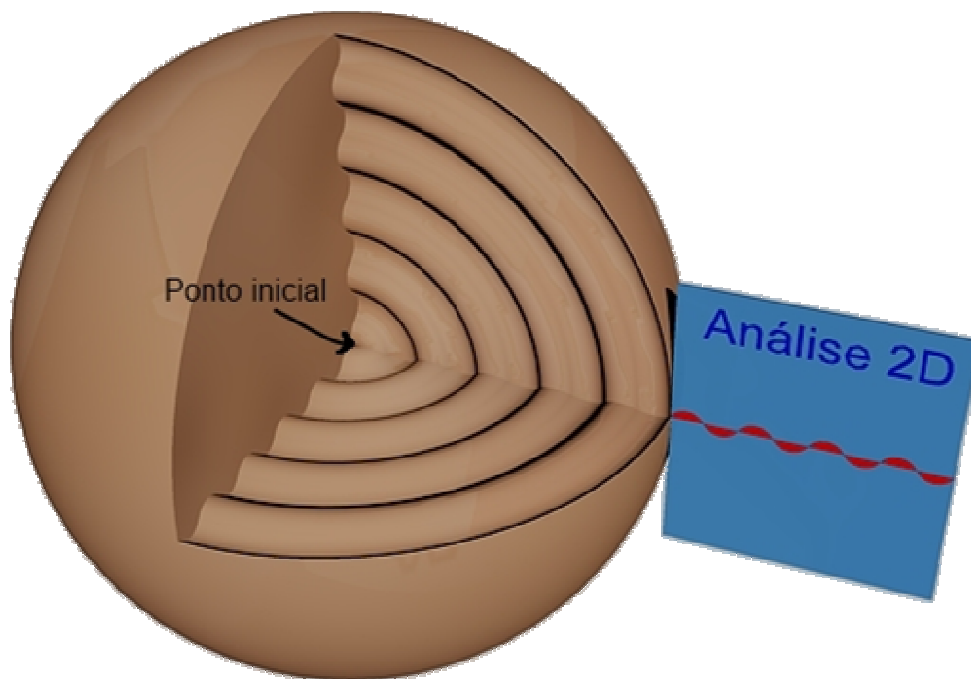


Figura 2.1 – Esquema tridimensional da propagação de uma onda.

2.1.2. INTENSIDADE SONORA

A pressão atmosférica na terra tem um valor aproximado de 101.400 Pa, ou seja cerca de 10^5 Pa [1]. É a variação deste valor que interessa medir por forma a se poder calcular o seu nível de pressão sonora.

A intensidade sonora (I) representa a quantidade média de energia que atravessa normalmente um plano de um metro quadrado por cada segundo e expressa-se em W/m^2 . O seu valor aumenta quanto maior for a variação de pressão e diminui com a distância à fonte:

$$I = \frac{p^2}{\rho \times c} = \frac{W}{4 \times \pi \times r^2} \quad (2.1)$$

Sendo:

$I \rightarrow$ Intensidade sonora (W/m^2);

$p \rightarrow$ Pressão sonora (Pa);

$\rho \rightarrow$ Massa volúmica do material (ar) $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$;

$c \rightarrow$ Celeridade (m/s);

$W \rightarrow$ Potência sonora (W);

$r \rightarrow$ Distância à fonte (m).

A potência sonora (W) caracteriza a fonte e é a quantidade total de energia que atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer por cada segundo.

A celeridade © é a velocidade de propagação da variação de pressão sonora. A velocidade de propagação no ar varia com a temperatura e pode ser matematicamente calculada pela seguinte expressão:

$$c = 20,045 \times \sqrt{273,15 + \theta} \quad (2.2)$$

Sendo:

$\theta \rightarrow$ Temperatura do ar (°C).

A celeridade noutros materiais é normalmente mais alta, quanto mais denso o material em questão maior a velocidade de propagação das ondas sonoras (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Velocidade de propagação do som em diversos materiais [2].

Meio de propagação das ondas sonoras	Velocidade (m/s)
Dióxido de carbono (0 °C)	258
Oxigénio	317
Ar (20 °C)	343
Hélio (20 °C)	927
Álcool etílico	1180
Chumbo	1200
Hidrogénio (0 °C)	1270
Mercúrio	1450
Água (20 °C)	1480
Borracha	1500
Água do mar	1522
Latão	3500
Cobre	3900
Alumínio	4420
Betão	5000
Aço	6000

A intensidade sonora está diretamente relacionada com a variação de pressão sonora e com a amplitude da onda (Figura 2.2). Quanto maior a variação de amplitude da onda sonora maior a variação de pressão sonora e consequentemente maior a intensidade sonora.

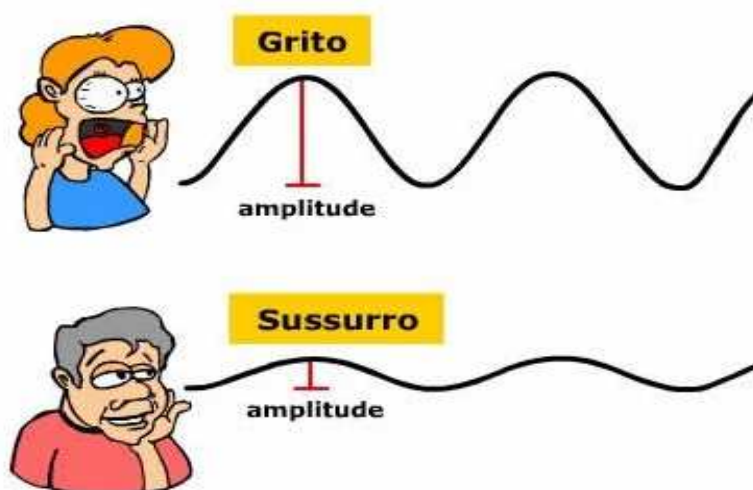


Figura 2.2 – Amplitude da onda sonora [3].

2.1.3. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

A variação de pressão mínima que um ser humano consegue detetar é aproximadamente cerca de 0,0001 Pa, ou seja 10^{-5} Pa (limiar da audição). Já o valor máximo é considerado a partir do qual o ruído passa a dor (limiar da dor) correspondendo a uma variação de pressão de 100 Pa. Logo a audição humana compreende-se em variações de pressão por volta dos 10^7 Pa [1].

Não sendo nada prático a avaliação do “volume” de um dado ruído em escala linear e sabendo que o ouvido responde a estes estímulos de forma quase logarítmica, tornou-se necessário criar o conceito de nível. O nível de pressão sonora é o resultado da variação de pressão sonora ouvida em relação ao valor mínimo que pode ser ouvido (equação 2.3) [4], sendo o resultado expresso em decibel, em homenagem a Alexander Graham Bell, historicamente conhecido como o pretenso inventor do telefone.

$$L_p = 20 \times \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (2.3)$$

Sendo:

$L_p \rightarrow$ Nível de pressão sonora (dB);

$p \rightarrow$ Variação da pressão;

$p_0 \rightarrow$ Pressão sonora de referência ($= 2 \times 10^{-5}$ Pa).

Logo, se existir uma variação de pressão de 2×10^{-5} Pa, ter-se-á um nível de pressão sonora de 0 dB (Quadro 2.2). É de notar que é possível obter-se resultados negativos, mas apenas se conclui que o ouvido humano é incapaz de o detetar.

Quadro 2.2 – Exemplos de pressões, intensidades e níveis de pressão sonora [5].

Exemplos	Distância da fonte r (m)	Nível de pressão sonora L (dB)	Pressão sonora p (Pa)	Intensidade sonora I (W/m ²)
Avião a jato	50	140	200	100
Limite do pânico	---	130	63	10
Limite do desconforto	---	120	20	1
Serra elétrica	1	110	6,3	10 ⁻²
Discoteca	1	100	2	10 ⁻³
Camião diesel	10	90	0,6	10 ⁻⁴
Rua movimentada	5	80	0,2	10 ⁻⁵
Aspirador	1	70	0,06	10 ⁻⁶
Voz em conversa normal	1	60	0,02	10 ⁻⁷
Casa comum	---	50	0,006	10 ⁻⁸
Biblioteca silenciosa	---	40	0,002	10 ⁻⁹
Quarto silencioso à noite	---	30	0,0006	10 ⁻¹⁰
Estúdio de TV em “silêncio”	---	20	0,0002	10 ⁻¹¹
Som das folhas ao vento	---	10	0,00006	10 ⁻¹²
Limiar da audição	---	0	0,00002	10 ⁻¹³

No ambiente existem várias fontes de pressão sonoras e todas elas em conjunto traduzem o nível de pressão sonora global do local. A adição de vários níveis faz-se da seguinte forma:

$$L_{soma} = 10 \times \log \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (2.4)$$

Aparelhos como sonómetros medem a pressão sonora eficaz ou RMS (*root mean square*) (Figura 2.3), que se resume a uma média quadrática dos valores das pressões mediadas durante a medição.

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.5)$$

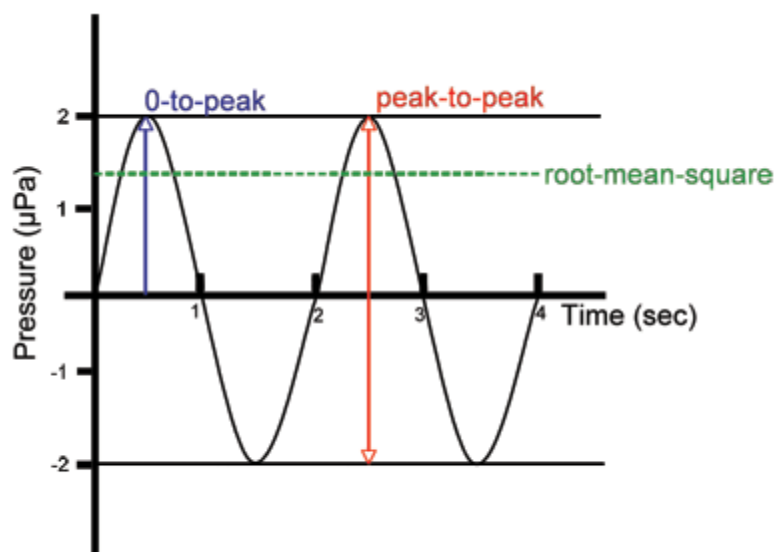


Figura 2.3 – Esquema do RMS [6].

2.1.4. FREQUÊNCIA SONORA

A frequência é outra característica bastante importante para caracterizar um som.

A frequência está relacionada com o número de ciclos da onda sonora que se repete durante um segundo e expressa-se o seu resultado em hertz (Hz). É muito difícil criar um som puro, cuja onda é longitudinalmente contínua composto por uma única frequência, sendo quase todos os sons que se ouvem compostos por várias frequências a atuar em simultâneo (Figura 2.4) [7].

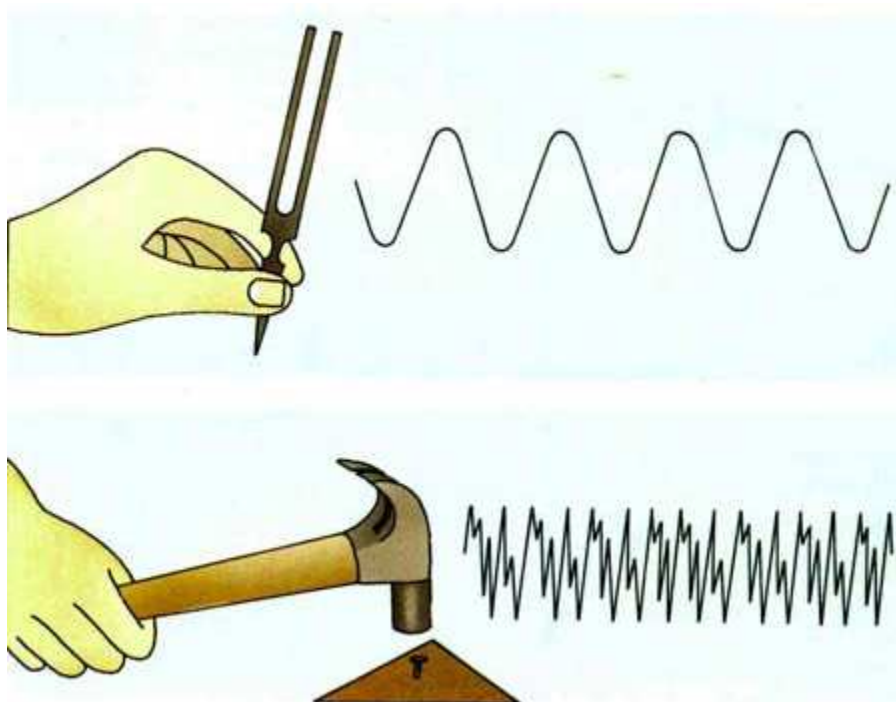


Figura 2.4 – Onda sonora pura (cima) e onda sonora composta (baixo) [7].

Os seres humanos jovens e de audição normal conseguem ouvir sons de frequências entre os 20 Hz e os 20.000 Hz. Ao longo do tempo esta capacidade vai-se perdendo ficando a gama audível menor, sendo a perda maior verificada nas altas frequências [1].

Qualquer som de frequências abaixo dos 20 Hz é denominado de infrassom e o ser humano não consegue ouvir, no entanto é utilizado por exemplo para detetar sismos ou erupções volcânicas. Som com frequência acima dos 20.000 Hz é denominado de ultrassom e também não é audível pelo ser humano, sendo frequentemente utilizado na medicina como por exemplo para a realização de ecografias. Vários animais são capazes de ouvir infrassons e/ou ultrassons (Figura 2.5) [8].

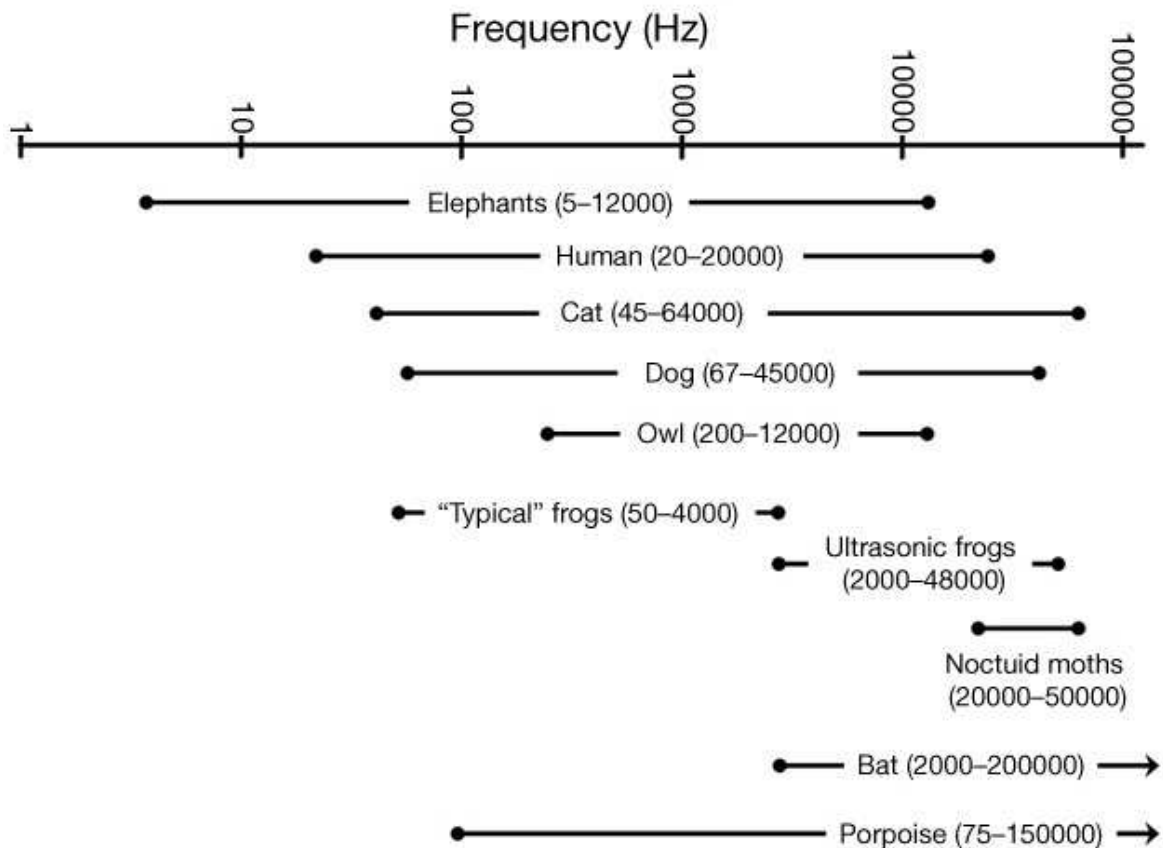


Figura 2.5 – Gama de frequência ouvida por vários animais [9].

Como a análise de centenas ou mesmo milhares de frequências seria muito trabalhosa, foi necessário agrupar-se as frequências por “bandas” com dimensões normalizadas, sendo o limite inferior (f_1) e superior (f_2) de cada banda possível de calcular:

$$f_1 = f_0 \times 2^{-K/2} \quad f_2 = f_0 \times 2^{K/2} \quad (2.6)$$

Sendo:

$f_0 \rightarrow$ Frequência central da banda (Hz);

$f_1 \rightarrow$ Limite inferior da banda f_0 (Hz);

$f_2 \rightarrow$ Limite superior da banda f_0 (Hz);

$K \rightarrow$ Constante (=1 para bandas de 1/1 oitava e =1/3 para bandas de 1/3 de oitava).

Os valores das bandas de 1/1 oitava que estão normalizados para o domínio do audível são: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz. Já as bandas em frequências de 1/3 de oitava são: 13, 16, 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.250, 1.600, 2k, 2.500, 3.150, 4k, 5k, 6.300, 8k, 10k, 12.500, 16k e 20k Hz [1].

A forma mais simples de analisar um ruído é pelo seu espectrograma (Figura 2.6). Nele é possível identificar as frequências que existem e o nível de pressão sonora que cada frequência produz.

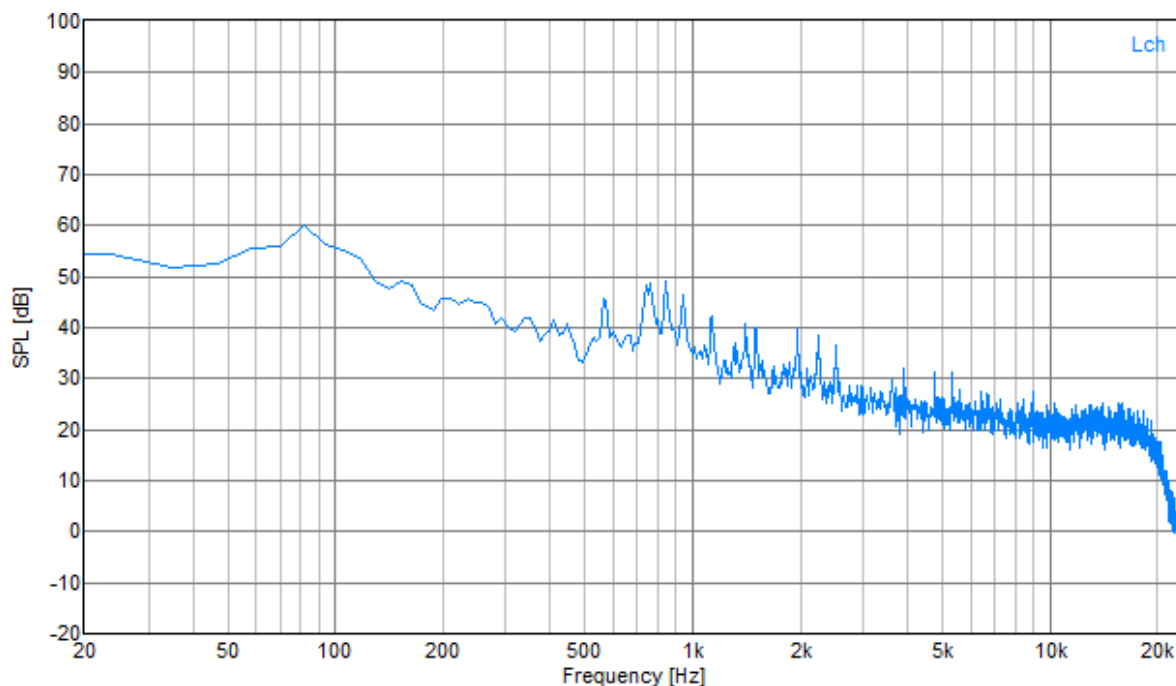


Figura 2.6 – Espectrograma realizado com programa DSSF3 [10].

O ouvido humano não é sensível de igual forma às várias frequências. Sons com o mesmo nível de intensidade e de frequências diferentes não são percebidos de igual forma, mas sim como se atuassem em níveis diferentes.

Desta forma surgem as curvas de igual sensibilidade auditiva (Figura 2.7). Analisando estas curvas compreende-se que por exemplo para um nível de pressão sonora de 50 dB a uma frequência de 1.000 Hz tem-se uma percepção de 50 fones. Para ter a mesma percepção mas aos 125 Hz é necessário ter um nível de pressão sonora de 68 dB.

Os sonómetros medem o nível de pressão sonora por frequência sem qualquer erro de sensibilidade. Por forma a tornar os sonómetros mais “humanos” foi necessário inserir filtros de ponderação que tornam os níveis medidos pelo sonómetro equiparáveis à audição humana. Os filtros tendem a atenuar o nível sonoro de acordo com as curvas de ponderação (Figura 2.8).

Sempre que os filtros são utilizados o resultado dos níveis sonoros deve expressar-se em dB(A), dB(B), dB(C) ou dB(D) conforme o filtro utilizado.

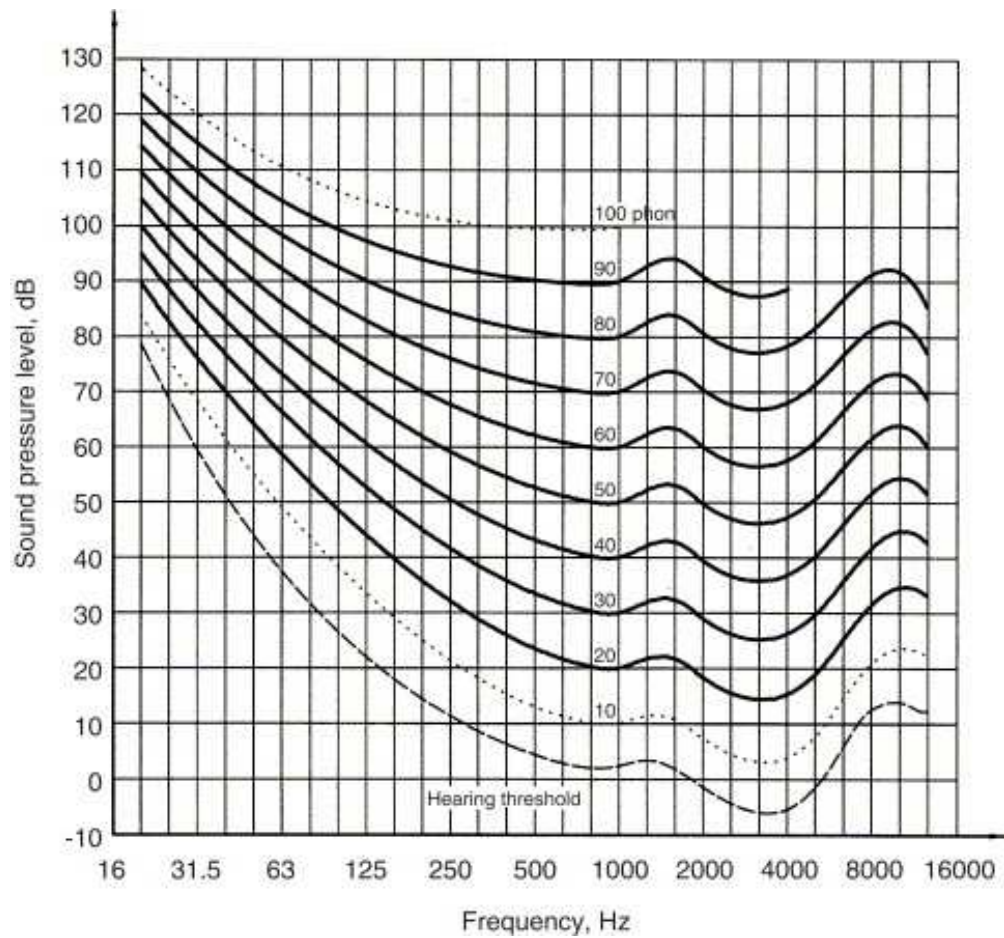


Figura 2.7 – Curvas de igual sensibilidade auditiva segundo ISO 226 [11].

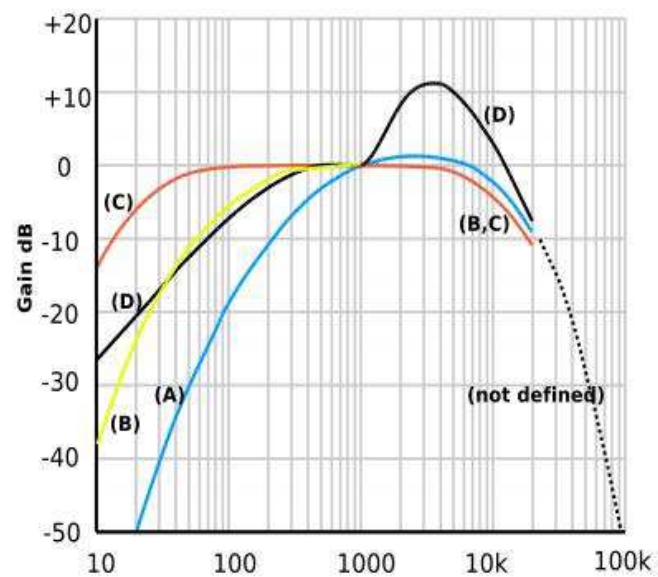


Figura 2.8 – Curvas de ponderação (filtros) [12].

2.2. ABSORÇÃO SONORA

2.2.1. CONCEITO

A absorção sonora (A) é uma propriedade acústica dos materiais, sendo possível de calcular segundo a seguinte expressão:

$$A = S \times \alpha \quad (2.7)$$

Sendo:

$A \rightarrow$ Absorção sonora do material (m^2);

$S \rightarrow$ Área da superfície do material exposto (m^2);

$\alpha \rightarrow$ Coeficiente de absorção sonora.

O coeficiente de absorção sonora (α) relaciona a quantidade de energia sonora que incide sobre o material e a energia que é absorvida por este (equação 2.8). A energia incidente pode ser refletida, absorvida ou transmitida (Figura 2.9). A energia absorvida normalmente transforma-se em energia calorífica devido a fricção nas partículas do ar com o material.

$$\alpha = \frac{E_{\text{Absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.8)$$

O valor do coeficiente de absorção sonora está compreendido entre 0 e 1. Se o coeficiente de absorção sonora for por exemplo igual a 0,2 significa que o material em questão absorve 20% da energia que sobre ele incide. Por vezes é possível encontrar-se catálogos com coeficientes superiores à unidade, que nunca deverão ser utilizados em cálculos, pois trata-se de uma irregularidade técnica inerente à medição devido à difração nos bordos do provete.

Um material poroso, tem associado a ele um coeficiente de absorção sonora elevado quando comparado com um material pouco poroso, como por exemplo uma pedra mármore polida.

Em geral, um material só se considera acusticamente absorvente quando o seu coeficiente de absorção sonora é superior a 0,5.

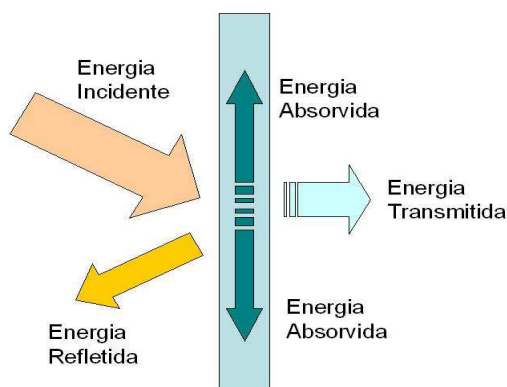


Figura 2.9 – Formas de energia sonora [12].

Na Europa existe a norma EN ISO 11654 [13] que deve ser utilizada para calcular o coeficiente de absorção médio (α_w) após medição por banda de frequência pela norma NP EN ISO 354 [14]. Esta norma passa por determinar o coeficiente (α) por cada frequência e ajustar a uma curva de referência.

2.2.2. MATERIAIS ABSORVENTES

2.2.2.1. Tipos de materiais absorventes

Os materiais absorventes podem ser agrupados em três categorias distintas em função das suas características, sendo eles:

- Porosos e fibrosos;
- Ressonadores;
- Membranas.

Cada um destes tipos de materiais atua numa gama diferente de frequências (Figura 2.10), sendo as membranas mais eficazes nas baixas frequências, os ressonadores nas médias frequências e os porosos e fibrosos nas altas frequências.

O ar também se comporta como um material absorvente.

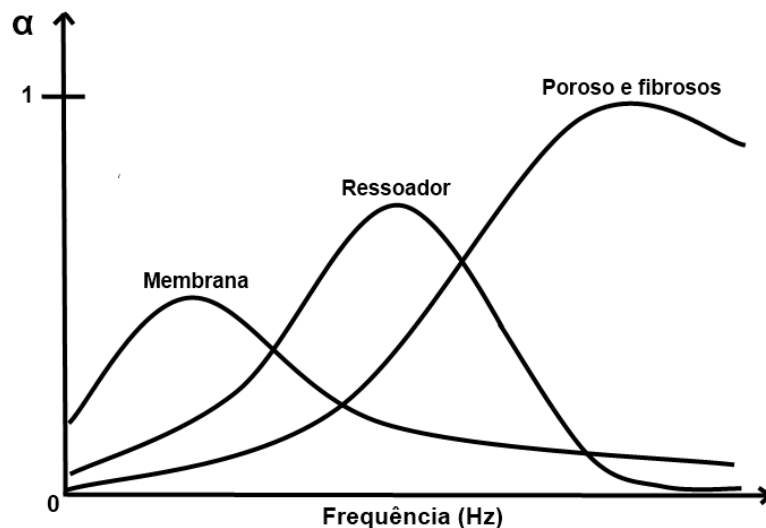


Figura 2.10 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais absorventes [adaptada de [1]].

2.2.2.2. Materiais porosos e fibrosos

Os materiais porosos e fibrosos (Figura 2.11) são mais eficazes nas altas frequências, que devido aos seus pequenos poros transformam a energia sonora incidente em pequenos movimentos das suas fibras originando calor. A sua qualidade como material absorvente pode ser drasticamente prejudicada quando pintados, pois a tinta tende a tapar os poros existentes prejudicando o seu funcionamento.

Existem vários tipos de materiais porosos e fibrosos que podem ser qualificados consoante as suas características físicas [1]:

- Tecidos e Alcatifas → A eficácia das alcatifas depende da espessura utilizada e os tecidos dependem do seu peso específico e do grau de franzido, ou seja, quanto mais pesada e franzida for a cortina melhor será o seu comportamento acústico.
- Massas porosas → Trata-se de minerais projetados com um peso específico de $150 (\pm 15) \text{ kg/m}^3$, apresentando um excelente comportamento acústico.

- Aglomerados de fibras de madeira → Trata-se de materiais que apresentam razoáveis comportamentos acústicos nas altas frequências.
- Fibras minerais → Como exemplo de materiais deste tipo existe a lã de rocha e a lã de vidro. São excelentes materiais absorventes de altas frequências, mas com o aumento da sua espessura existe um ganho nas baixas frequências, podendo tornar este material um ótimo absorvente em todas as frequências.
- Materiais plásticos → O poliuretano expandido e o poliestireno expandido são dois exemplos de materiais deste tipo e apresentam razoável comportamento absorvente nas altas frequências.
- Aglomerados de cortiça → Existe o aglomerado negro de cortiça e o aglomerado composto de cortiça. O primeiro pode ser considerado um eficaz absorvente, mas o segundo embora por vezes utilizado não atinge os valores de α de 0,5.

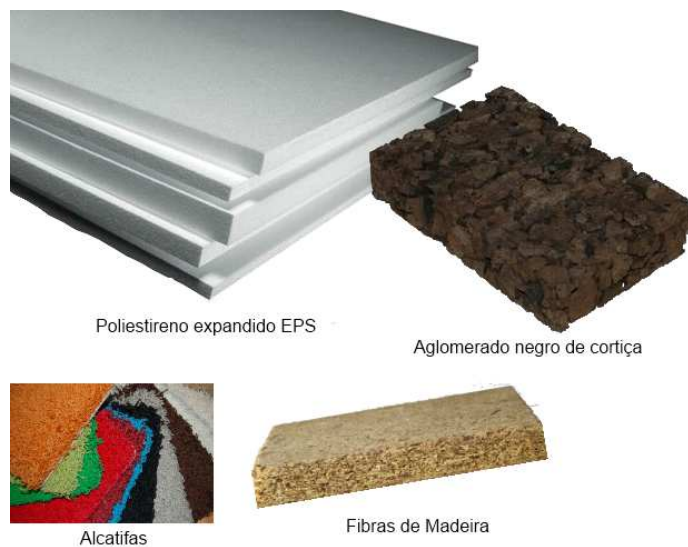


Figura 2.11 – Materiais porosos e fibrosos.

2.2.2.3. Ressonadores

Os ressoadores ou ressoadores de *Helmholtz* são sistemas para atuar na absorção preferencialmente de médias frequências. Um ressonador é um sistema composto por uma cavidade de paredes rígidas e com um pequeno orifício, apresentando uma forma idêntica a uma garrafa. A sua frequência de eficácia máxima pode ser calculada da seguinte forma:

$$f = \frac{c}{2 \times \pi} \sqrt{\frac{S}{V(l + 1,6 \times r)}} \quad (2.9)$$

Sendo:

c → Celeridade do ar (m/s);

S → Área do orifício de entrada (gargalo) (m²);

V → Volume da cavidade interior (m³);

l → Comprimento do “gargalo” (m);

r → Raio do orifício de entrada (gargalo) (m).

A forma mais usual de utilizar este sistema são os ressoadores agrupados (Figura 2.12). Podem ser criados com um simples painel perfurado próximos de uma superfície rígida criando uma caixa-de-ar. A sua frequência eficaz máxima pode ser determinada da seguinte forma:

$$f = \frac{10 \times c}{2 \times \pi} \sqrt{\frac{P}{d(e + 1,6 \times r)}} \quad (2.10)$$

Sendo:

$c \rightarrow$ Celeridade do ar (m/s);

$P \rightarrow$ Percentagem de área perfurada (%);

$d \rightarrow$ Largura da caixa-de-ar (cm);

$e \rightarrow$ Espessura da placa perfurada (cm);

$r \rightarrow$ Raio de cada furação (cm).

Na caixa-de-ar deve ser colocado material absorvente para melhorar a sua eficácia. Quanto maior a percentagem de furação melhor eficácia terá o painel, no entanto para percentagens superior a 25% o painel fica controlado pelo efeito do material absorvente.



Figura 2.12 – Ressorador Agrupado. Placa perfurada em teto suspenso [15].

2.2.2.4. Membranas

As membranas ressonantes (Figura 2.13) são sistemas para atuar nas baixas frequências. Trata-se de uma estrutura bastante fina que quando atingida por uma frente de onda sonora entra em vibração, atenuando desta forma as possíveis reflexões. Funciona de forma idêntica a um baloiço. Quando se pretende parar um baloiço não vamos contra ele, mas sim segue-se a sua direção de movimento acrescido de alguma resistência na direção inversa à do movimento.



Figura 2.13 – Membrana ressonante [16].

2.2.2.5. Absorção do ar

A absorção sonora devida ao ar é baixa quando comparada com os materiais anteriores, no entanto existe e deve ser considerada. Quanto maior for a sala maior será o efeito do ar, ou seja, em salas de reduzido volume o efeito do ar é quase desprezável, mas este intensifica-se em salas de maior volume.

O ar quase não absorve nas baixas frequências, sendo apenas de interesse prático a absorção acima dos 1000 Hz. O coeficiente de absorção sonora do ar (m) (Quadro 2.3) varia com a humidade relativa, sendo menor o seu valor em humidades relativas elevadas, razão pela qual é possível ouvir-se ruídos mais distantes em dias de chuva.

Quadro 2.3 – Absorção sonora do ar (m^{-1}) [1].

HR (%)	<1 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,008	0,016	0,056	0,188	0,34
40	0	0,004	0,008	0,044	0,096	0,21
60	0	0,003	0,004	0,028	0,064	0,14
80	0	0,002	0,004	0,008	0,052	0,11

2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.3.1. CONCEITO

As ondas sonoras propagam-se em todas as direções a partir da fonte, logo no interior de um espaço fechado existirá ondas sonoras diretas e refletidas em direção ao recetor. A onda direta é a que chega sempre em primeiro lugar e com maior nível de pressão sonora, pois a sua distância percorrida é menor, originando o mínimo de atenuação. Posteriormente serão recebidas as várias ondas sonoras que provem de reflexões nos vários planos do espaço (Figura 2.14).

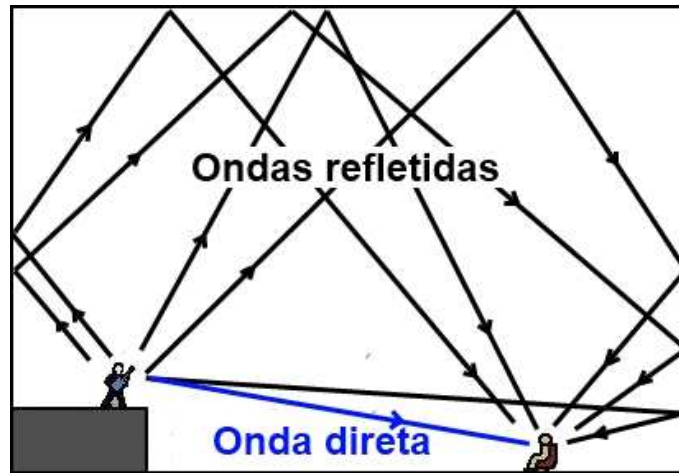


Figura 2.14 – Ondas e reflexões numa sala [adaptado de [17]].

O tempo de reverberação (TR) de um compartimento é em termos genéricos o tempo que demora desde a chegada da onda direta até a chegada da última onda sonora refletida. Como todos os ambientes estão sujeitos a um ruído de fundo, ou seja, a um nível de pressão sonora muito superior a 0 dB, definiu-se o tempo de reverberação como sendo o tempo que demora um ruído a decair em 60 dB, após ser interrompida a sua emissão (Figura 2.15 A).

Imagine-se que se pretendia medir o tempo de reverberação de uma biblioteca com um ruído de fundo de aproximadamente 40 dB (ver Quadro 2.2). Logo, para medir um decaimento de 60 dB seria necessário produzir um ruído superior a 100 dB, o que não seria prático. Desta forma é usual medir-se o TR_{30} ou TR_{20} , ou seja, o tempo que demora a decair um som em 30 dB ou 20 dB respetivamente, sendo posteriormente realizado uma extrapolação dos valores para obter-se o TR_{60} (Figura 2.15 B).

Como se pode rapidamente perceber, tempos de reverberação elevados trazem a permanência de ruídos durante bastante tempo e é sobre este fenómeno que este trabalho se insere.

Várias fórmulas matemáticas foram criadas para prever o tempo de reverberação de um espaço. Vejam-se de seguida as mais conhecidas.

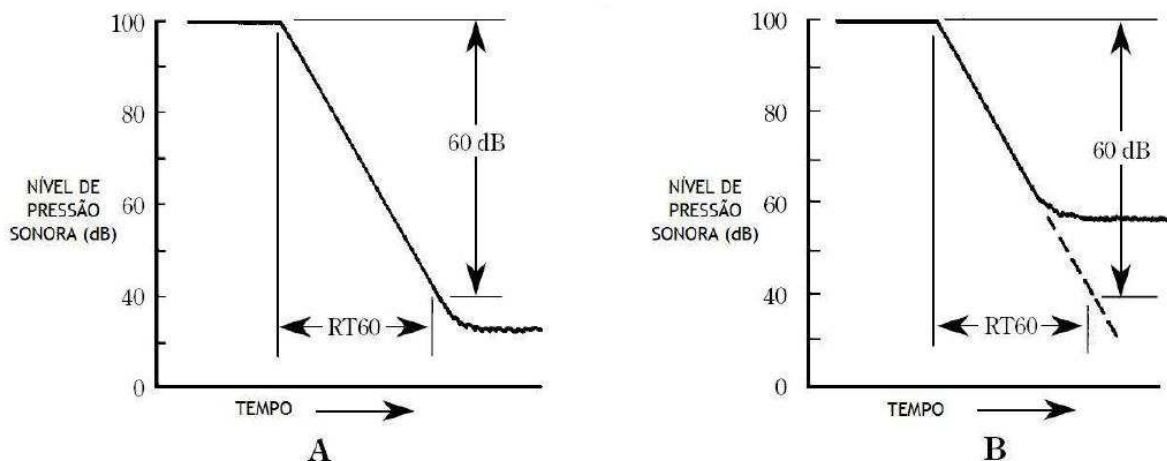


Figura 2.15 – Decaimento do tempo de reverberação [18].

2.3.2. FÓRMULA DE SABINE

Em 1898, o físico americano Wallace Clement Sabine foi o primeiro a formular uma relação matemática para determinar o tempo de reverberação de um espaço, após várias experiências na sua Universidade. Para o efeito relacionou o volume, a absorção sonora e o tempo de reverberação, criando a atualmente conhecida “Fórmula de Sabine” (equação 2.11).

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.11)$$

Sendo:

TR → Tempo de reverberação (s);

V → Volume do espaço em análise (m³);

A → Absorção sonora (m²).

O coeficiente de 0,16 pode ser matematicamente calculado com maior rigor (equação 2.12). Este coeficiente está relacionado com a temperatura do ar, como já foi anteriormente visto que influencia na velocidade de propagação das ondas sonoras.

$$K = \frac{24 \times \ln(10)}{c} \quad (2.12)$$

Sendo:

K → Coeficiente da fórmula de Sabine (normalmente 0,16);

c → Celeridade do ar (m/s).

A fórmula de Sabine pode ser escrita de forma mais generalizada (equação 2.13), entrando com absorções localizadas (por exemplo o mobiliário) e a absorção do ar.

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A_{superficies} + A_{localizada} + A_{ar}} = \frac{0,16 \times V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \times S_i + \sum_{j=1}^M A_j + m \times V} \quad (2.13)$$

Sendo:

TR → Tempo de reverberação (s);

V → Volume do espaço em análise (m³);

Os coeficientes m já foram apresentados no Capítulo 2.2.2.5.

2.3.3. FÓRMULA DE EYRING

Após a fórmula de Sabine, outras fórmulas foram desenvolvidas. Em 1930, Norris-Eyring desenvolveu uma outra expressão. Partindo do princípio que uma sala seria retangular, então o comprimento médio das reflexões seria:

$$L = \frac{4 \times V}{S} \quad (2.14)$$

O número total de reflexões por segundo é a relação entre a velocidade de propagação da onda sonora com o comprimento médio das reflexões, obtendo-se assim:

$$N = \frac{c \times S}{4 \times V} \quad (2.15)$$

Como por cada reflexão é absorvida parte da energia, então por cada reflexão a energia restante seria de $(1-\bar{\alpha})$. A mesma onda sonora se refletir duas vezes a sua energia será de $(1-\bar{\alpha})^2$, ou seja é exponencialmente reduzida.

Desta forma conclui-se que a atenuação total ao longo de um determinado tempo T é de $(1 - \bar{\alpha})^{N \times T}$.

Como a definição do tempo de reverberação é a redução de 60 dB, então:

$$-60 = 10 \times \log[(1 - \bar{\alpha})^{N \times T}] \quad (2.16)$$

Dando origem à fórmula de Norris-Eyring [19]:

$$T = \frac{0,16 \times V}{-S \times \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (2.17)$$

É de notar que foi utilizado um valor de c para uma temperatura de 24 °C. Como se pode verificar, devido ao uso de um coeficiente de absorção médio dos materiais faz com que esta fórmula seja a mais adequada quando existem apenas superfícies envolventes com coeficientes de absorção semelhantes.

2.3.4. FÓRMULA DE MILLINGTON-SETTE

Pelo facto da fórmula de Norris-Eyring dever ser só utilizada quando os coeficientes de absorção são aproximadamente idênticos, devido a tratar-se de uma média dos coeficientes de absorção, surge em 1932 a fórmula de Millington-Sette (2.18).

Esta fórmula baseada na ideia de Norris-Eyring prevê uma melhor solução para quando os coeficientes de absorção do espaço são bastante distintos.

$$T = \frac{0,16 \times V}{-\sum_{i=1}^N S_i \times \ln(1-\alpha_i)} \quad (2.18)$$

Como se pode verificar, esta fórmula é idêntica à de *Norris-Eyring* mas com a diferença de assumir todos os coeficientes de absorção dos diversos materiais, tornando-a mais adequada quando os coeficientes de absorção sonora são distintos.

2.3.5. OUTRAS FÓRMULAS

É de notar que as duas anteriores fórmulas apresentadas baseiam-se em espaços paralelepípedicos. Em 1970 surge a fórmula de Kuttruff (2.19), esta fórmula relaciona o tempo de reverberação com a geometria da sala.

$$T = \frac{0,16 \times V}{-S \times \ln(1-\bar{\alpha}) \times \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} \times \ln(1-\bar{\alpha})\right]} \quad (2.19)$$

O coeficiente γ^2 é a variância relativa da distribuição do comprimento dos percursos percorridos das ondas sonoras que está em função da geometria do espaço (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 – Exemplos de valores de γ^2 [1].

Dimensões	γ^2	Dimensões	γ^2
Esfera	0,125	1:1:10	0,415
1:1:1	0,342	1:5:5	0,464
1:1:2	0,356	1:2:10	0,465
1:2:2	0,363	1:5:10	0,510
1:2:5	0,403	1:10:10	0,613
1:1:5	0,412		

Ao longo dos anos várias outras fórmulas foram idealizadas em função de situações específicas, mas tendo como base as fórmulas já apresentadas.

2.4. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.4.1. CONCEITOS

O ser humano vivendo em sociedade é constantemente forçado a relacionar-se com outros humanos para a realização de fins comuns. É a partir da comunicação que o ser humano estabelece relações que sustentam a vida em sociedade.

Existem diversas formas de comunicação a utilizar, tal como a escrita, a arte, a imagem, entre outros. Mas é a linguagem verbal a mais utilizada por todos no dia-a-dia.

Sempre que existe comunicação verbal de uma mensagem entre um emissor e um recetor, é possível que a mensagem chegue ao recetor não completamente clara, ou seja, pouco inteligível. Isto deve-se ao meio de transmissão utilizado.

Se numa determinada sala existir demasiado ruído de fundo torna-se necessário que o emissor eleve o seu tom de voz para que a sua mensagem possa ser ouvida pelo recetor. Mas, infelizmente torna-se impossível o ser humano atingir níveis de pressão sonora demasiado elevados, podendo tornar a inteligibilidade da palavra bastante reduzida.

A voz humana é diferente entre diversos oradores, podendo ser analisada a sua emissão sob quatro aspetos [1]:

- Frequência;
- Intensidade;
- Duração;
- Direccionalidade.

Em termos de frequência as palavras apresentam uma vasta gama de frequências, podendo desde já ser comparado o sexo masculino do sexo feminino. O sexo masculino emite preferivelmente frequências um pouco mais baixas (voz mais grave) do que o sexo feminino (voz mais aguda), pertencendo desta forma as mais altas frequências ao sexo feminino.

Existem inúmeras palavras na língua portuguesa e diversas formas de pronunciar. Os fonemas são os sons mais elementares da fala. Conjugando vários fonemas obtém-se as sílabas que por sua vez formam as palavras. Desta forma compreende-se que os fonemas são a forma mais elementar da comunicação verbal. A língua portuguesa é composta por aproximadamente 33 fonemas diferentes [20]. O fonema que apresenta maior frequência é o /s/ (por exemplo da palavra sábado), com valores compreendidos entre os 3500 e os 7000 Hz (Figura 2.16). O fonema de frequência menor é o /u/ (por exemplo da palavra Sul), apresentando valores compreendidos entre os 150 e os 300 Hz.

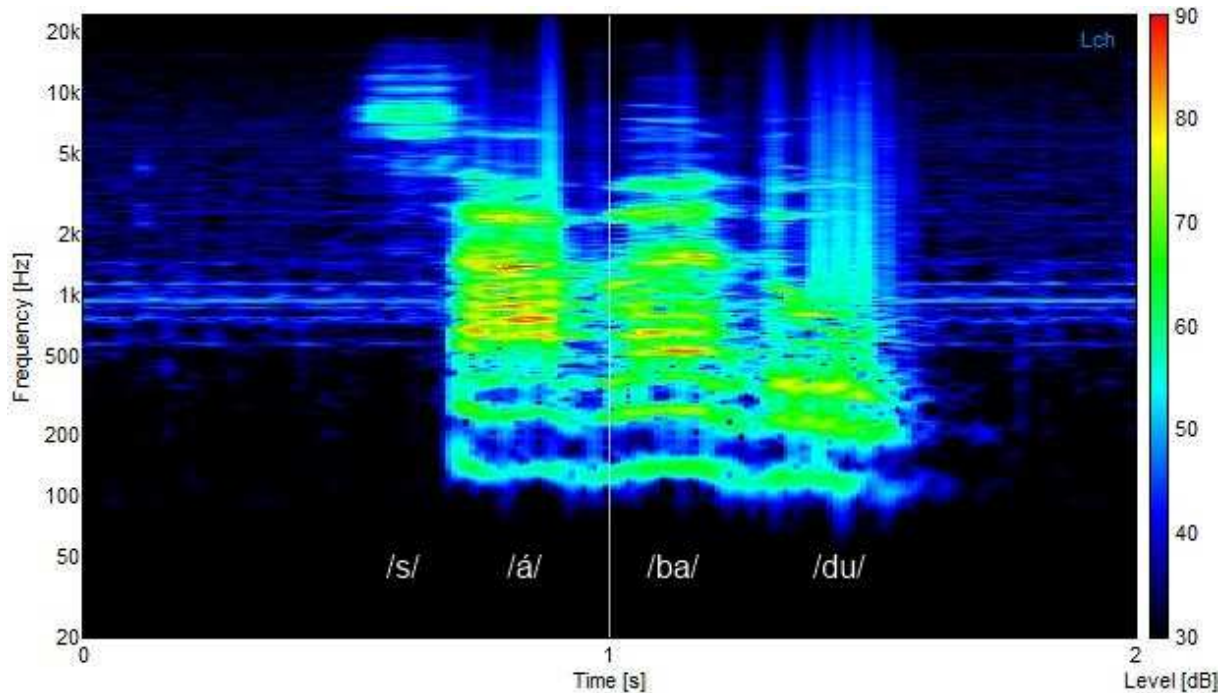


Figura 2.16 – Espectrograma da palavra “sábado” realizado com programa DSSF3 [10].

Pela Figura 2.16 é possível perceber que a voz humana pode variar bastante, podendo atingir o mínimo de 60 Hz e um máximo de 7000 Hz, dependendo do orador.

Em termos de intensidade as vogais são emitidas com maior nível de pressão sonora. De forma geral as vogais podem ser de 21 a 28 dB mais intensas que as consoantes [1].

Em relação à duração, as vogais são emitidas durante períodos mais extensos que as consoantes. Em média as vogais são emitidas durante 90 ms e as consoantes em cerca de 20 ms [1].

Relativamente à direccionalidade, a voz humana não é emitida de igual forma em todas as direções. A cabeça funciona como uma barreira acústica, impedindo que a intensidade dos sons emitidos não se propaguem de igual forma em todas as direções. Na Figura 2.17 é possível ver-se a distribuição da palavra em duas bandas de frequência diferentes, sendo a figura A correspondente ao plano horizontal e a figura B ao plano vertical, a seta representa a direção da visão do orador.

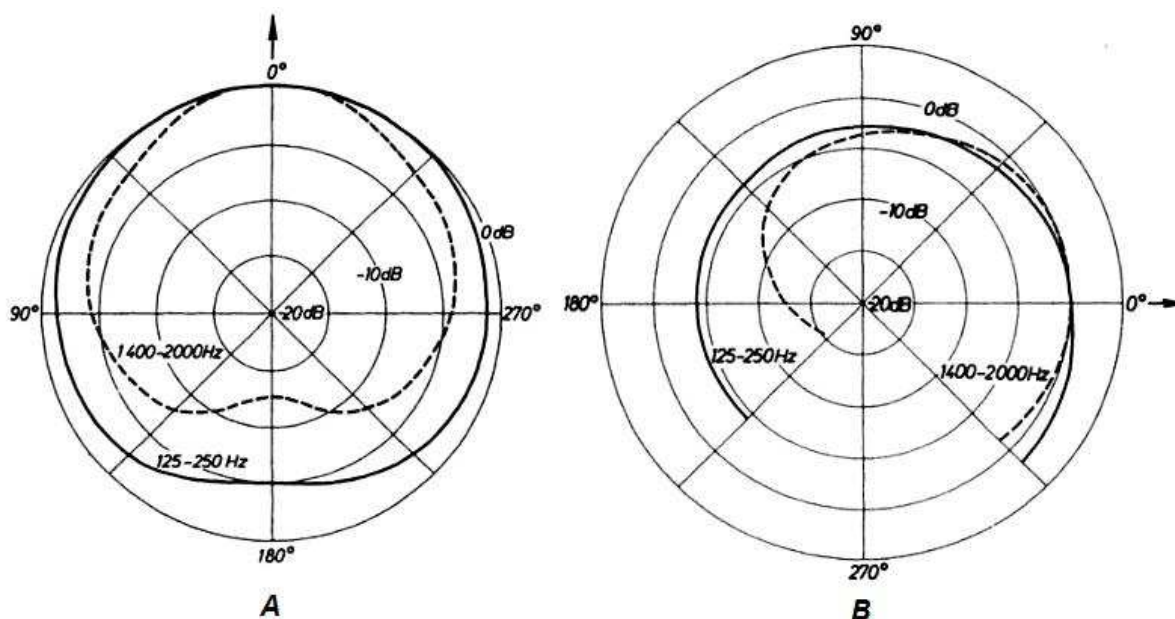


Figura 2.17 – Emissão da voz no plano horizontal (A) e vertical (B) para as baixas e médias frequências [21].

Pela Figura 2.17 pode constatar-se que existe uma perda, por cada 180° em plano horizontal, de 5 dB nas baixas frequências e de 12 dB em médias frequências. Segundo Carvalho, pode considerar-se também uma perda de 20 dB por cada 180° em plano horizontal nas altas frequências (4000 Hz) [1].

Em resumo, o Quadro 2.5 apresenta a variabilidade da voz diferenciando as vogais das consoantes.

Quadro 2.5 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1].

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	Baixas	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB por -180°
Consoantes	Altas	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB por -180°

Existem diversos testes para a avaliação da inteligibilidade da palavra, podendo dividir-se em dois grupos distintos: testes objetivos e subjetivos. Os testes subjetivos baseiam-se em leituras de frases ou palavras para um grupo que as escreve e conforme a maior frequência de acerto, maior será a inteligibilidade do local. Os testes objetivos são realizados por aparelhos, não necessitando da resposta humana, apresentando menor probabilidade de erros.

2.4.2. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

2.4.2.1. Índice de articulação (AI)

French e Steinberg desenvolveram o conceito do índice de articulação, considerando que a parte mais importante da fala compreende-se nas frequências de 200 a 6100 Hz [22].

Para determinar o índice de articulação (AI) segue-se os seguintes passos:

1. Mede-se o nível de pressão sonora do ruído de fundo (*RF*) de uma determinada sala em 1/3 de oitavas, podendo também ser realizado em 1/1 oitava mas o resultado não será tão preciso.

2. Ao nível de conversação (nc) subtrai-se o valor do ruído de fundo obtido no ponto anterior, sendo 30 dB o máximo possível. O nível de conversação corresponde ao nível de pressão sonora medido a 1 metro de distância de um homem comum acrescido de 12 dB (Quadro 2.6).

Quadro 2.6 – Nível de conversação por frequência [22].

1/3 Oitava		1/1 Oitava	
Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)
200	67	250	72
250	68	500	73
315	69	1000	78
400	70	2000	63
500	68	4000	58
630	66		
800	65		
1000	64		
1250	62		
1600	60		
2000	59		
2500	57		
3150	55		
4000	53		
5000	51		

3. Multiplica-se o resultado anterior por um fator de ponderação (peso). Este fator serve para dar importância às frequências que necessitam ser melhor percebidas para que seja inteligível a palavra. Os fatores de peso a considerar são os expostos no Quadro 2.7.
4. Realiza-se o somatório dos resultados obtidos no ponto anterior por cada banda de frequência e divide-se por 10.000, obtendo-se desta forma o valor do AI.

Quadro 2.7 – Fatores de ponderação por frequência [22].

1/3 Oitava		1/1 Oitava	
Frequência	Peso	Frequência	Peso
(Hz)	(p)	(Hz)	(p)
200	4	250	18
250	10	500	50
315	10	1000	75
400	14	2000	107
500	14	4000	83
630	20		
800	20		
1000	24		
1250	30		
1600	37		
2000	37		
2500	34		
3150	34		
4000	24		
5000	20		

Como forma de exemplo dos passos que devem ser seguidos pode-se utilizar o Quadro 2.8 ou idêntico mas para bandas de frequência de 1/3 oitava.

Para avaliar o grau de inteligibilidade utiliza-se valores tabelados (Quadro 2.9). O grau de privacidade é a capacidade de um determinado local ser ruidoso o suficiente para tornar qualquer tipo de conversa totalmente confidencial e é o inverso do grau de inteligibilidade. Este tipo de fenómeno de tornar necessário espaços ruidosos pode ser verificado em salas de espera de consultórios, onde é normal a existência de televisores ou rádios em funcionamento, tornando o espaço ruidoso o suficiente para que não seja possível perceber-se o que acontece nos consultórios.

Quadro 2.8 – Exemplo de quadro para obtenção do parâmetro AI [1].

Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de fundo (RF) em dB	nc-rf (max 30)	(nc-RF)*p
250	72	18			
500	73	50			
1000	78	75			
2000	63	107			
4000	58	83			
				$\Sigma=$	
				$AI=\Sigma/10.000=$	

Quadro 2.9 – Percepção subjetiva para a inteligibilidade e privacidade da palavra de acordo com o parâmetro AI [1].

AI (Índice de articulação)	Grau de privacidade	Grau de inteligibilidade
<0,05	Confidencial	Nula
[0,05 – 0,20[	Privacidade normal	Muito fraca
[0,20 – 0,35[	Marginal	Fraca
[0,35 – 0,40[	Pobre	Sofrível
[0,40 – 0,65[	Em geral, sem privacidade	Boa
$\geq 0,65$	Privacidade totalmente inexistente	Excelente comunicação (para conferências, aulas, etc.)

2.4.2.2. Speech intelligibility index (SII)

Em 1997 foi apresentada uma nova e mais elaborada versão que o índice de articulação (AI) denominada de SII (*speech intelligibility index*) de acordo com a norma ANSI S 3.5 [23].

De acordo com a norma ANSI S 3.5:1997 são permitidos quatro métodos de avaliação para determinar o valor de SII, tendo cada um deles um número diferente de bandas de frequência em análise. Quanto menor o número de bandas de frequência em análise pior será a sua precisão.

- Método das bandas críticas (21 bandas de frequências);
- Método de 1/3 de oitava (18 bandas de frequências);
- Método de igual contribuição de banda crítica (17 bandas de frequências);
- Método de 1/1 oitava (6 bandas de frequências).

O resultado final do parâmetro SII varia entre 0 e 1, sendo péssima e ótima inteligibilidade da palavra, respetivamente. Pode também concluir-se pela análise da norma que os valores de SII podem ser avaliados subjetivamente em relação à inteligibilidade de acordo com o Quadro 2.10.

Quadro 2.10 – Percepção subjetiva para a inteligibilidade da palavra de acordo com o parâmetro SII [23].

SII	Avaliação Subjetiva da inteligibilidade da palavra
1	Ótima
[0,75 – 1[	Boa
]0,45 – 0,75[	Satisfatória
]0 – 0,45]	Fraca
0	Péssima

Para determinar o valor de SII, basta seguir os oito seguintes passos, que estão mais pormenorizadamente descritos na norma:

1. Escolher o método a utilizar;

Para cada método existe uma tabela com dados necessários para utilizar nos passos seguintes. Como o processo apenas difere entre o “método de 1/1 oitava” e os restantes, apenas são aqui referidas as tabelas referentes ao método de 1/3 de oitava (Figura 2.18) e ao método de 1/1 oitava (Figura 2.19).

Band no.	Frequency band			Standard speech spectrum level for stated vocal effort, dB				Reference internal noise spectrum level dB	Free-field to eardrum transfer function dB
	Nominal midband freq Hz	Band width adj, Δ dB	Band importance	Normal	Raised	Loud	Shout		
1	160	15.65	0.0083	32.41	33.81	35.29	30.77	0.60	0.00
2	200	16.65	0.0095	34.48	33.92	37.76	36.65	-1.70	0.50
3	250	17.65	0.0150	34.75	38.98	41.55	42.50	-3.90	1.00
4	315	18.65	0.0289	33.98	38.57	43.78	46.51	-6.10	1.40
5	400	19.65	0.0440	34.59	39.11	43.30	47.40	-8.20	1.50
6	500	20.65	0.0578	34.27	40.15	44.85	49.24	-9.70	1.80
7	630	21.65	0.0653	32.06	38.78	45.55	51.21	-10.80	2.40
8	800	22.65	0.0711	28.30	36.37	44.05	51.44	-11.90	3.10
9	1000	23.65	0.0818	25.01	33.86	42.16	51.31	-12.50	2.60
10	1250	24.65	0.0844	23.00	31.89	40.53	49.63	-13.50	3.00
11	1600	25.65	0.0882	20.15	28.58	37.70	47.65	-15.40	6.10
12	2000	26.65	0.0898	17.32	25.32	34.39	44.32	-17.70	12.00
13	2500	27.65	0.0868	13.18	22.35	30.98	40.80	-21.20	16.80
14	3150	28.65	0.0844	11.55	20.15	28.21	38.13	-24.20	15.00
15	4000	29.65	0.0771	9.33	16.78	25.41	34.41	-25.90	14.30
16	5000	30.65	0.0527	5.31	11.47	18.35	28.24	-23.60	10.70
17	6300	31.65	0.0364	2.59	7.67	13.87	23.45	-15.80	6.40
18	8000	32.65	0.0185	1.13	5.07	11.39	20.72	-7.10	1.80
Overall SPL, dB				62.35	68.34	74.85	82.30		

Figura 2.18 – Tabela para cálculo de SII pelo método de 1/3 de oitava [23].

Band no.	Frequency band			Standard speech spectrum level for stated vocal effort, dB				Reference internal noise spectrum level dB	Free-field to eardrum transfer function dB
	Nominal midband freq Hz	Band width adj, Δ dB	Band importance	Normal	Raised	Loud	Shout		
1	250	22.48	0.0617	34.75	38.98	41.55	42.50	-3.90	1.00
2	500	25.48	0.1671	34.27	40.15	44.85	49.24	-9.70	1.80
3	1000	28.48	0.2373	25.01	33.86	42.16	51.31	-12.50	2.60
4	2000	31.48	0.2648	17.32	25.32	34.39	44.32	-17.70	12.00
5	4000	34.48	0.2142	9.33	16.78	25.41	34.41	-25.90	14.30
6	8000	37.48	0.0549	1.13	5.07	11.39	20.72	-7.10	1.80
Overall SPL, dB				62.35	68.34	74.85	82.30		

Figura 2.19 – Tabela para cálculo de SII pelo método de 1/1 de oitava [23].

2. Determinar E'_i , N'_i e T'_i para cada banda de frequência;

Sendo E'_i o nível de voz equivalente. Pode ser medido para um determinado orador ou utilizados os valores padrão existentes nas tabelas (*Standard speech spectrum level for stated vocal effort*) (exemplo Figura 2.18 ou Figura 2.19); N'_i é o nível de ruído equivalente do local, este é medido no espaço a avaliar; T'_i é o nível equivalente do limiar da audição, assume-se que é zero, exceto em casos de auditores com problemas auditivos.

3. Calcular o nível de mascaramento equivalente, Z_i , para cada banda de frequência;

- Para o método 1/1 oitava, o valor de Z_i é igual ao valor de N'_i , obtido no ponto 2;
- Para os restantes métodos é necessário proceder da seguinte forma:

Determinar $V_i = E'_i - 24$, após conhecido o valor de V_i , define-se o valor de B_i como sendo o maior valor entre V_i e N'_i . O valor de Z_i para a frequência mais baixa é sempre igual a B_i . Para as restantes frequências procede-se da seguinte forma:

- Para o método de 1/3 de oitava calcula-se o valor de C_i com a seguinte fórmula:

$$C_i = -80 + 0,6[B_i + 10\log(F_i) - 6,353] \quad (2.20)$$

Sendo F_i o valor da frequência central (*nominal midband freq.*) retirado da tabela apropriada (Figura 2.18). O valor de Z_i é determinado com a seguinte expressão:

$$Z_i = 10\log\left(10^{0,1 \times N'_i} + \sum_{k=1}^{i-1} 10^{0,1 \times [B_k + 3,32 \times C_k \times \log\left(\frac{0,89 \times F_i}{F_k}\right)]}\right) \quad (2.21)$$

- Para os métodos da banda crítica e de igual contribuição de banda crítica o valor de C_i é determinado pela seguinte expressão:

$$C_i = -80 + 0,6[B_i + 10\log(h_i - l_i)] \quad (2.22)$$

Sendo os valores de h_i e l_i é o valor do limite de frequência da banda i mais alto e mais baixo, respetivamente, sendo os valores referidos retirados das tabelas apropriadas. O valor de Z_i é determinado com a seguinte expressão:

$$Z_i = 10\log\left(10^{0,1 \times N'_i} + \sum_{k=1}^{i-1} 10^{0,1 \times [B_k + 3,32 \times C_k \times \log\left(\frac{F_i}{h_k}\right)]}\right) \quad (2.23)$$

4. Calcular o nível interno de ruído equivalente, X'_i , para cada banda de frequência;

O seu valor é determinado pela seguinte expressão:

$$X'_i = X_i + T'_i \quad (2.24)$$

Sendo o valor de X_i o valor de referência no nível interno de ruído, retirado da tabela apropriada (exemplo Figura 2.18 e Figura 2.19). O valor de T'_i é o valor determinado no ponto 2.

5. Calcular o nível de distorção equivalente, D_i , para cada banda de frequência, sendo o seu valor definido pelo maior valor entre Z_i e X'_i ;
6. Calcular o fator de distorção do nível da palavra, L_i , para cada banda de frequência;

Para determinar o seu valor utiliza-se a seguinte expressão:

$$L_i = 1 - (E'_i - U_i - 10)/160 \quad (2.25)$$

Sendo o valor de E'_i obtido no ponto 2 e o valor de U_i o valor padrão do nível da palavra em esforço normal, retirado das tabelas apropriadas (exemplo Figura 2.18 e Figura 2.19). Se o valor de L_i for superior a 1, então deve ser adotado o valor de 1.

7. Calcular o parâmetro A_i , indicando a proporção da inteligibilidade de cada banda de frequência;

A_i é calculado primeiramente por uma constante temporária K_i pela equação 2.26, sendo o seu resultado compreendido entre 0 e 1:

$$K_i = (E'_i - D_i + 15)/30 \quad (2.26)$$

Sendo os valores de E'_i e D_i já anteriormente determinados.

O parâmetro A_i é determinado pela multiplicação de L_i por K_i , sendo L_i o valor obtido no ponto 6.

8. Determinar o valor final do SII.

O valor final do SII é determinado pela seguinte equação:

$$SII = \sum_{i=1}^n I_i \times A_i \quad (2.27)$$

Sendo o valor de I_i um peso de importância da banda para a inteligibilidade da palavra (*band importance*), sendo o valor retirado das tabelas apropriadas (exemplo Figura 2.18 e Figura 2.19).

2.4.2.3. Speech interference level (SIL)

O *speech interference level* ou abreviado SIL é um método de medição bastante simples usado para caracterizar a interferência na comunicação de um ambiente ruidoso. Este método não deve ser utilizado em locais onde possa existir fatores que possam distorcer a palavra, como por exemplo locais com tempos de reverberação elevados.

Para determinar o valor de SIL para um local realiza-se uma média aritmética dos valores dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo das bandas de oitava de 500, 1000 e 2000 Hz (equação 2.28).

$$SIL (dB) = \frac{RF_{500\text{ Hz}} + RF_{1000\text{ Hz}} + RF_{2000\text{ Hz}}}{3} \quad (2.28)$$

O Quadro 2.11 apresenta os valores de SIL para o qual é possível a comunicação da palavra, dependendo do sexo, tom de voz e distância entre orador e ouvinte. Ou seja, se existir um valor de SIL de 67 dB significa que, se o orador e o ouvinte estiverem a 1 metro de distância, é necessário que seja

usado um esforço de voz muito alto no caso de sexo masculino ou gritando no caso de ser do sexo feminino, para todas as palavras serem inteligivelmente percebidas.

Uma melhor forma de compreender, pode ser pela Figura 2.20. Para um determinado nível de SIL, o nível de esforço de voz a usar deve ser superior. Caso o SIL apresente valores superiores aos do esforço de voz “Gritando” então é impossível existir comunicação verbal totalmente inteligível.

Quadro 2.11 – Valores de SIL (dB) para o qual a comunicação é no limite possível, sendo M – Masculino e F – Feminino [1].

Distância (m)	SIL (dB)							
	Esforço da voz							
	Normal		Elevado		Muito alto		Gritando	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0,3	68	63	74	69	80	75	86	81
1	58	53	64	59	70	65	76	71
2	52	47	58	53	64	59	70	65
3	48	43	54	49	60	55	66	61
4	46	41	52	47	58	53	64	59

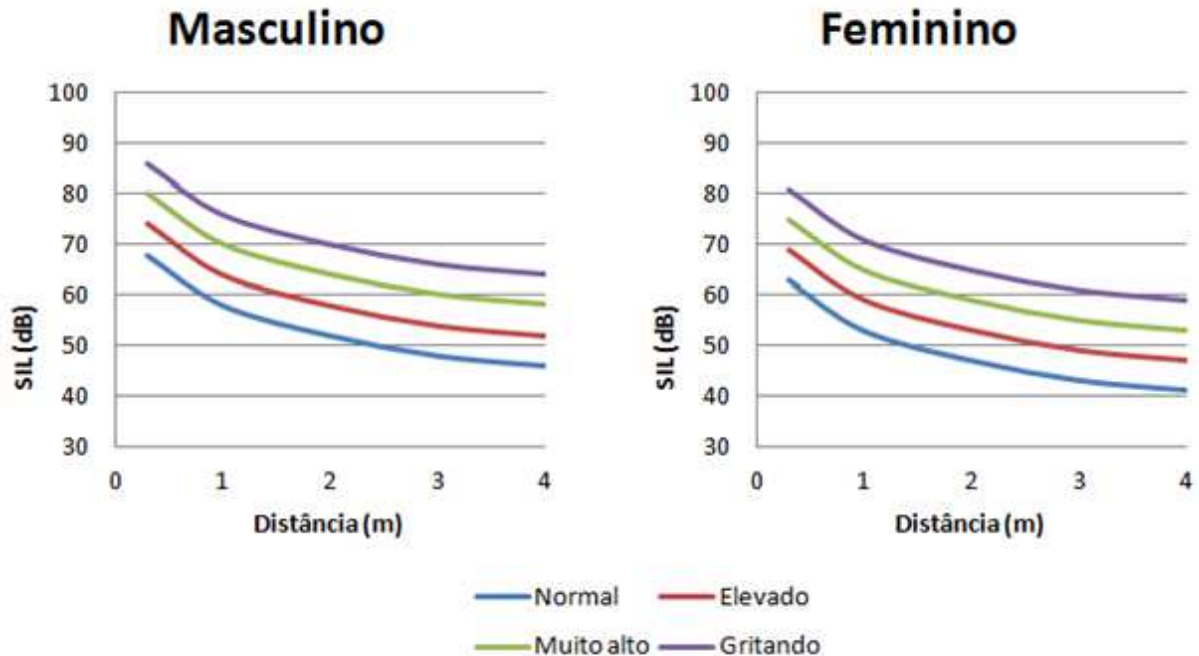


Figura 2.20 – Valores de SIL (dB) para o qual a comunicação é no limite possível para quatro níveis de esforço de voz [Adaptado de [1]].

2.4.2.4. Rapid speech transmission index (RASTI)

O método conhecido por *rapid speech transmission index* (RASTI) é utilizado para a avaliação objetiva da inteligibilidade da palavra. Trata-se de um método mais curto do *speech transmission index* (STI). Foi elaborado por Houtgast e Steeneken, sendo o RASTI criado para diminuir o tempo de medições, tornando o processo mais rápido em relação ao STI. Tanto o método STI como o RASTI baseiam-se no método *Modulation Transfer Function* (MTF).

Para medição do valor de RASTI utiliza-se um transmissor (Figura 2.21), colocado na posição do orador, que gera um ruído de intensidade de referência de 59 dB e 50 dB para frequências de 500 e 2000 Hz. A fim de produzir um efeito mais “humano”, o ruído de 500 Hz é emitido com frequências modeladas de 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz e 8 Hz, o ruído de 2000 Hz é emitido com frequências modeladas de 0,7 Hz, 1,4 Hz, 2,8 Hz, 5,6 Hz e 11,2 Hz. Portanto são emitidos nove valores diferentes de índices de modelação m_0 [24].

Um recetor (Figura 2.22), colocado na posição do ouvinte, mede a onda sonora recebida, ou seja o índice de modelação m_i . A relação m do índice de modelação inicial e final é obtido pela seguinte expressão:

$$m = \frac{m_0}{m_i} \quad (m \leq 1) \quad (2.29)$$

Após obtidos os nove valores de m , converte-se cada um deles para x (equação 2.30). Segundo a norma IEC 268-16:1988 [24] este valor pode ser interpretado como uma relação do sinal-ruído aparente, expresso em dB.

$$x = 10 \times \log \left(\frac{m}{1-m} \right) \quad (2.30)$$

Aos valores de x superior a +15 dB deve ser substituído por +15 dB e valores inferiores a -15 dB devem ser substituídos por -15 dB, ou seja, todos os valores de x devem compreender-se entre -15 dB e +15 dB. Após determinar os nove valores de x faz-se uma média aritmética obtendo-se o valor de \bar{x} .

Para finalmente se calcular o valor de RASTI, converte-se o valor de \bar{x} numa escala de zero a um, pela seguinte fórmula (2.31):

$$RASTI = \frac{\bar{x}+15}{30} \quad (2.31)$$

Este método deve ser substituído pelo STI sempre que se verifique pelo menos uma das seguintes situações:

- A transmissão da voz ser essencialmente linear, ou seja, sem pausas na produção dos níveis sonoros;
- A transmissão de voz ser fora das bandas de frequência dos 200 Hz aos 6 kHz; isto deve-se ao facto do método ser baseado em um espectro sonoro bastante limitado;
- Ruído de fundo com tons audíveis, com picos marcantes ou depressões no espectro de banda de 1/1 oitava;
- O ruído de fundo ser impulsivo;
- O tempo de reverberação ser demasiado longo em função da frequência.

Os valores de RASTI variam entre zero e um, para uma péssima e ótima inteligibilidade da palavra, respetivamente.

A norma IEC 268-16 define uma classificação subjetiva da inteligibilidade da palavra em função do valor de RASTI obtido (Quadro 2.12).

Quadro 2.12 – Classificação RASTI [24].

RASTI	Classificação subjetiva da inteligibilidade da palavra
[0 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Fraca
[0,45 – 0,60[	Razoável
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 – 1]	Excelente



Figura 2.21 – Transmissor RASTI Brüel & Kjær 4225
[Fotografia do autor].



Figura 2.22 – Recetor RASTI Brüel & Kjær 4419
[Fotografia do Autor].

3

NECESSIDADE DE BOAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS NAS ESCOLAS

3.1. IMPORTÂNCIA GERAL

A aprendizagem nas escolas é um dos principais momentos das vidas humanas e é nela que será definido grande parte daquilo que o ser humano será no futuro, a sua educação, a sua inteligência, os seus gostos, em resumo, a sua forma de ser. Desta forma, as escolas devem apresentar condições que potenciem a aprendizagem, não é apenas ter boa higiene, ter lucro ou ter prestígio, é necessário que os alunos por elas formados sejam bons e tenham suficientes conhecimentos adquiridos.

Uma sala de aula não precisa apenas de ser silenciosa, necessita de ter também condições acústicas ideais para a realização de debates entre os alunos, tornando a inteligibilidade da palavra num fator de elevada importância.

A aprendizagem atualmente baseia-se no passar de informação entre professor e aluno. Este passar de informação é na sua maior parte pela comunicação verbal, desta forma, a existência de condições acústicas adversas para a comunicação acabam sempre por influenciar os alunos, prejudicando-os.

As condições acústicas adversas podem ser devido a tempos de reverberação desadequados para uma boa inteligibilidade ou mesmo níveis de ruído elevados, provenientes de diversas fontes. As fontes podem ser externas como o ruído produzido pelo tráfego rodoviário, construções nas imediações, parques infantis próximos, ou fontes de origem interna como o ruído proveniente dos corredores, ruído de salas adjacentes, ruído dos computadores ou projetores, ruído do sistema AVAC, entre outros.

Um estudo realizado por Evans *et al.*, avaliou a influência do ruído numa população de 115 crianças do Vale do Tirol na Áustria [25]. Metade da amostra vive em locais onde o nível de pressão sonora dia-noite é menor do que 50 dB(A), sendo a restante amostra sujeita a um nível de pressão sonora dia-noite superior a 60 dB(A). A origem do ruído era essencialmente rodoviário e ferroviário. Concluiu-se que as crianças sujeitas aos níveis de pressão sonora mais elevados apresentavam uma pressão sanguínea acima do normal e níveis de cortisol mais elevados. O cortisol é uma hormona produzida na glândula suprarrenal e os seus níveis aumentam com o aumento do stress.

3.2. IMPORTÂNCIA PARA O ALUNO

É de salientar que crianças apresentam sempre maior dificuldade em perceber as palavras em relação a indivíduos com maior idade, isto deve-se ao seu campo lexical ser ainda reduzido. Qualquer nova palavra tem a necessidade de ser 100% compreendida, sendo esta a única forma de aprender corretamente. Contudo a existência de condições adversas provoca uma maior dificuldade de aprendizagem.

Em estudos realizados conclui-se sempre que alunos que estejam expostos a situações de ruído apresentam resultados piores quando comparados com os alunos em que o ruído não seja tão acentuado [26].

A falta de inteligibilidade da palavra e o ruído de fundo existente podem ter as seguintes consequências para o aluno, possíveis de detetar ao longo do tempo [[27], [28]]:

- Atraso na aprendizagem;
- Aproveitamento escolar diminuído;
- Dificuldade de compreensão;
- Diminuição da capacidade de atenção;
- Diminuição da capacidade de memorização;
- Fadiga mental;
- Falta de interesse no estudo;
- Inquietude;
- Irritabilidade;
- Outros.

Estes problemas intensificam-se para crianças que apresentem problemas auditivos, sendo necessário sempre condições acústicas muito mais melhoradas.

Quando um aluno fica em contacto com uma língua nova, o seu campo lexical é nulo e desta forma as salas de aula de língua estrangeira deveriam também apresentar um tratamento bastante melhorado, pois os alunos necessitam de perceber na totalidade as palavras proferidas.

3.3. IMPORTÂNCIA PARA O PROFESSOR

O facto de escolas apresentarem acústica desadequada não afeta somente os alunos, os professores também são afetados. A importância da acústica nas salas em relação aos professores prende-se apenas com questões de saúde, principalmente problemas de nível vocal [26].

Quando uma sala apresenta demasiado tempo reverberante ou um ruído de fundo alto, o professor tem a necessidade de aumentar o seu tom de voz e é sobre esta necessidade de aumento do nível da voz que provoca perturbações na saúde do professor.

Considera-se que o professor deve emitir um nível de pressão sonora superior em 15 dB ao nível de pressão sonora do ruído de fundo, e este aumento necessita de um maior esforço nas cordas vocais, provocando inúmeras consequências para ele.

O esforço de voz acrescido nos professores pode causar os seguintes problemas [[29], [30]]:

- Rouquidão;
- Dores das cordas vocais;
- Dores de garganta;
- Perda da capacidade de fala;
- Nível de projeção diminuído;
- Dores de cabeça;
- Efeitos psicológicos;
- Baixas médicas;
- Perda de concentração por parte dos alunos;
- Outros.

Desta forma compreende-se que a falta de condições acústicas para um professor, não provoca somente problemas ao próprio mas também aos seus alunos. Quando o ruído afeta o professor a sua qualidade como professor vê-se ameaçada, pois irá afetar o rendimento dos alunos, piorando bastante o seu desempenho escolar.

Efeitos como rouquidão prejudicam a inteligibilidade da palavra, pois as palavras não são emitidas corretamente logo será quase impossível entender-se. Quando tal acontece não existe qualquer tipo de sala capaz de melhorar a sua inteligibilidade. Como tal cabe aos profissionais de acústica criar salas acusticamente tratadas para que o desempenho do professor não seja ameaçado.

Como pode constatar-se a acústica adversa em salas de aula provoca problemas de saúde a professores e baixos resultados escolares nos alunos, sendo assim extremamente importante realizar escolas com Acústica adequada.

4

RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE REVERBERAÇÃO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Existem diversos problemas que afetam a inteligibilidade da palavra.

Como já atrás demonstrado, a inteligibilidade da palavra apresenta maior importância nas altas frequências, ou seja nas consoantes. Sendo as consoantes emitidas num curto espaço de tempo e com menores níveis de pressão sonora em relação às vogais, tornam o tempo de reverberação a principal característica acústica capaz de danificar a inteligibilidade da palavra.

Quando uma vogal é emitida em locais onde o tempo de reverberação é demasiado longo, ela impede a percepção da consoante seguinte. Se o decaimento sonoro da vogal for demasiado lento, ao emitir-se depois a consoante de nível sonoro inferior, esta será sobreposta, pelo “ruído” provocado pela vogal, impedindo que a consoante seja ouvida.

Como forma de exemplo veja-se a palavra inglesa *back* (Figura 4.1). Se for emitida a sílaba “ba” com um decaimento sonoro de 40 dB por segundo, ou seja, um decaimento sonoro provocado por um tempo de reverberação de 1,5 s (linha a tracejado), irá apresentar um nível de pressão sonora superior ao da vogal “ck” quando emitida. Esta sobreposição esconde a sílaba “ck” tornando a palavra fracamente inteligível. Se o tempo de reverberação for de 1,0 s (linha a cheio), quando for emitida a sílaba “ck” esta já apresentará um nível de pressão sonora superior ao da sílaba “ba”, tornando a palavra perfeitamente inteligível.

Se a palavra não for inteligível poderá provocar possíveis interpretações como *back*, *bath*, *bad*, entre outras. Colocando a palavra *back* numa frase tornaria a palavra mais fácil de perceber, devido ao seu contexto. Esta capacidade de “supor” vai-se ganhando com o tempo, e uma criança por apresentar um vocabulário inferior, tem maior dificuldade em completar as falhas de inteligibilidade existentes. Desta forma os locais onde a importância é a comunicação, deverão ter tempos de reverberação adequados e baixos.

Outro fenómeno provocado por altos tempos de reverberação prende-se com o aumento do ruído de fundo. Se o tempo de reverberação for demasiado alto, cada vez mais haverá a necessidade de elevar o nível de tom de voz que por sua vez elevará ainda mais o nível de ruído, tornando-se num ciclo. Tais situações são possíveis de verificar em cantinas escolares, onde existe um aumento de ruído com o passar do tempo de funcionamento.

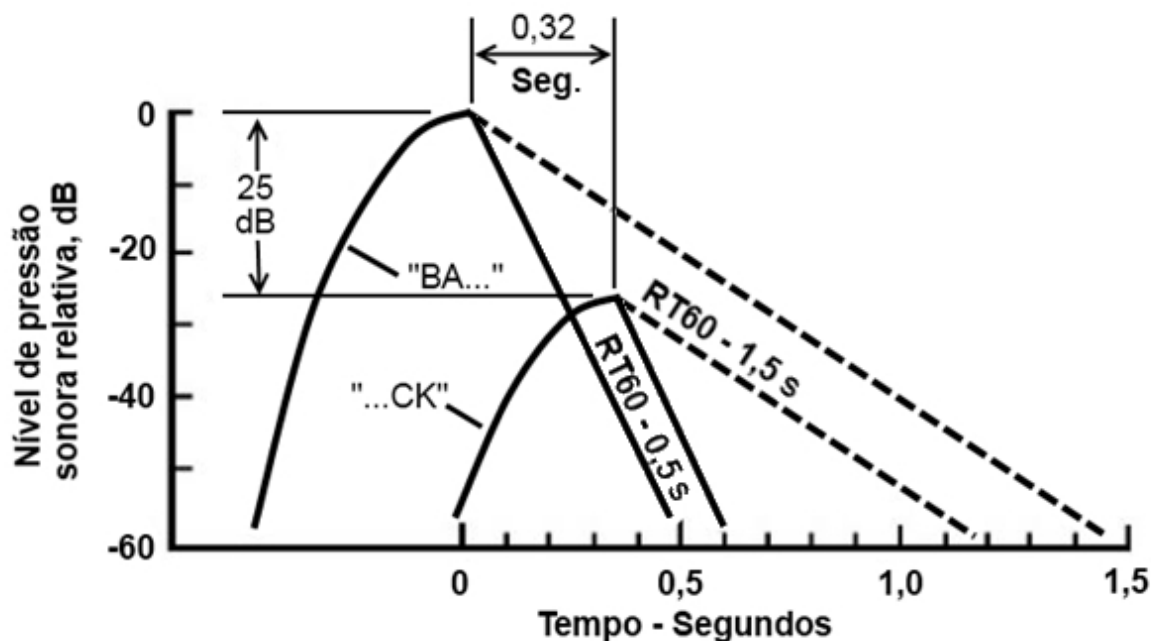


Figura 4.1 – Efeito do tempo de reverberação na palavra *back* [18].

Com todos estes fatores pode-se chegar à conclusão que quanto menor o tempo de reverberação de uma sala melhor será a sua inteligibilidade da palavra, mas tal não é necessariamente verdade.

O ser humano é capaz de diferenciar o som refletido do som direto sempre que o som refletido chegue após 80 ms em relação ao som direto. Assim compreende-se que tempos inferiores não criam qualquer tipo de perturbação no ouvinte, podendo as ondas refletidas ser utilizadas a fim de potenciar um aumento do nível de pressão sonora do orador. Além disso, um TR próximo de zero cria espaços muito “secos”, desconfortáveis e que podem criar sonolência. Desta forma aconselha-se que sejam utilizados tempos de reverberação não muito próximos de 0 (zero), além de que não é possível colocar um espaço com tempo de reverberação de zero.

Estudos realizados demonstraram que o tempo de reverberação ótimo seria o menor possível mas aproveitando a existência das primeiras ondas refletidas (*early sound*) que amplificam o nível sonoro para os ouvintes mais afastados do orador. Vejam-se de seguida alguns desses estudos.

Hodgson e Nosal em estudos realizados na Universidade da Columbia Britânica [31] concluíram que teoricamente o tempo de reverberação ótimo a utilizar em salas de aulas estaria numa complexa equação em função do volume do espaço, da área absorvente, da distância entre o orador (fonte) e o ouvinte (recetor), do nível de pressão sonora da fonte e sua direccionalidade, da distância à fonte de ruído, nível de pressão sonora e da direccionalidade da fonte de ruído. Como forma de resumo o Quadro 4.1 mostra as conclusões obtidas pelo estudo.

Quadro 4.1 – Tempos de reverberação ótimos em função do volume [Adaptado de [31]].

SNS (dB)	Parâmetro	Volume (m ³)			
		100	300	500	1000
		r_s (m)			
		4,9	7,7	9,5	12,7
40	TR _{OPT} (s)	0,08	0,10	0,11	0,12
	SNR (dB)	31,4	27,4	25,4	22,6
	U ₅₀ (dB)	28,1	23,9	21,9	19,2
	α_{OPT}	0,76	0,79	0,81	0,84
30	TR _{OPT} (s)	0,14	0,14	0,16	0,19
	SNR (dB)	22,7	18,9	17,2	14,8
	U ₅₀ (dB)	19,2	15,2	13,4	10,8
	α_{OPT}	0,64	0,67	0,68	0,69
20	TR _{OPT} (s)	0,17	0,23	0,27	0,35
	SNR (dB)	14,5	11,4	10,0	8,3
	U ₅₀ (dB)	10,7	7,2	5,6	3,3
	α_{OPT}	0,49	0,49	0,49	0,47
10	TR _{OPT} (s)	0,29	0,43	0,53	0,72
	SNR (dB)	6,4	4,2	3,2	1,9
	U ₅₀ (dB)	2,3	- 0,6	- 2,0	- 4,1
	α_{OPT}	0,32	0,30	0,29	0,26

U₅₀ – medida para avaliar a inteligibilidade da palavra (>1 indica satisfatória inteligibilidade da palavra);

TR_{OPT} – tempo de reverberação ótimo;

SNR – diferença entre o sinal e o ruído medido no recetor;

α_{OPT} – coeficiente de absorção ótimo calculado a partir de T_{OPT};

SNS – diferença entre o sinal e o ruído medido na fonte;

r_s – distância entre a fonte e o recetor.

Os tempos de reverberação ótimos variam conforme o volume do espaço e da relação sinal-ruído. Desta forma é possível verificar que para um nível de sinal-ruído baixo (10 dB) e para um volume de 1000 m³ o tempo de reverberação ótimo apresenta o valor mais elevado, isto deve-se a necessidade de aproveitar-se as ondas sonoras refletidas para intensificar o nível sonoro. Já para um compartimento pequeno e com um sinal-ruído alto (40 dB), as reflexões existentes só prejudicariam a inteligibilidade da palavra, daí o tempo de reverberação ótimo ser tão baixo.

Devido aos resultados apresentados serem os “ótimos”, foi criada uma analogia para determinar os tempos de reverberação “satisfatórios”. Para tal admitiu-se que seria satisfatório ter um valor de U_{50} superior à unidade. Obtendo-se para cada uma das anteriores situações e para os piores casos possíveis os resultados presentes no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Tempos de reverberação satisfatórios para o pior caso possível de r_s [adaptado de [31]].

SNS (dB)	Volume (m^3)			
	100	300	500	1000
	r_s (m)			
	4,9	7,7	9,5	12,7
40	0 – 0,9	0 – 0,9	0 – 0,9	0 – 0,9
30	0 – 0,9	0 – 0,9	0 – 0,9	0 – 0,9
20	0 – 0,8	0 – 0,8	0,1 – 0,8	0,2 – 0,8
10	0,2 – 0,5	Na	Na	Na

Na – inteligibilidade satisfatória não pode ser alcançada;
 SNS – diferença entre o sinal e o ruído medido na fonte;
 r_s – distância entre a fonte e o recetor.

Pelo Quadro 4.1 para locais de grandes volumes ter tempos de reverberação maiores ajudaria na inteligibilidade da palavra, no entanto, também é possível concluir que estes espaços mesmo com tempos de reverberação mais elevados a inteligibilidade da palavra (U_{50}) são menor quando comparada com espaços mais pequenos.

No Quadro 4.2 verifica-se que o volume não interfere nos TR satisfatórios nas condições mais normais (SNS = 30 dB).

De forma idêntica ao estudo apresentado, um estudo realizado por Bistafa e Bradley, intitulado *Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics*, é baseado no pressuposto que o som se comporta num campo difuso [32]. Neste estudo é apresentada uma relação entre o valor de STI e o tempo de reverberação. Segundo a equação 4.1 pode determinar-se o MTF que por sua vez é utilizado para determinar o valor de STI para os vários tempos de reverberação.

$$m(F) = \left[1 + \left(\frac{2 \times \pi}{13,82} \times F \times TR \right)^2 \right]^{-0,5} \times [1 + 10^{(L_n - L_{sala})}]^{-1} \quad (4.1)$$

Sendo F o valor das 14 frequências modeladas utilizadas na avaliação STI, variando de 0,63 a 12,5 Hz e o parâmetro $L_n - L_{sala}$ a diferença entre o nível de ruído de fundo e o nível de pressão sonora da palavra tendo em consideração o efeito reverberado. O valor de L_{sala} pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$L_{sala} = L_{palavra} + 10 \times \log \left(\frac{1}{r_h^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4.2)$$

Sendo $L_{palavra}$ o nível de pressão sonora do orador, medido a 1 metro de distância e r_h a distância de reverberação, ou seja é a distância para a qual a energia do som refletido é igual à energia do som direto.

Os resultados do tempo de reverberação que maximizam o valor de STI foram calculados a partir da fórmula anterior, sendo indicados no Quadro 4.3 e na Figura 4.2.

Quadro 4.3 – TR ótimo segundo Bistafa e Bradley [adaptado de [32]].

$L_{palavra} - L_n$ (dB)	TR ótimo (s)		
	Volume (m ³)		
	100	300	500
30	0,1	0,2	0,2
25	0,2	0,2	0,3
20	0,2	0,3	0,4
15	0,3	0,4	0,5
10	0,5	0,7	0,8

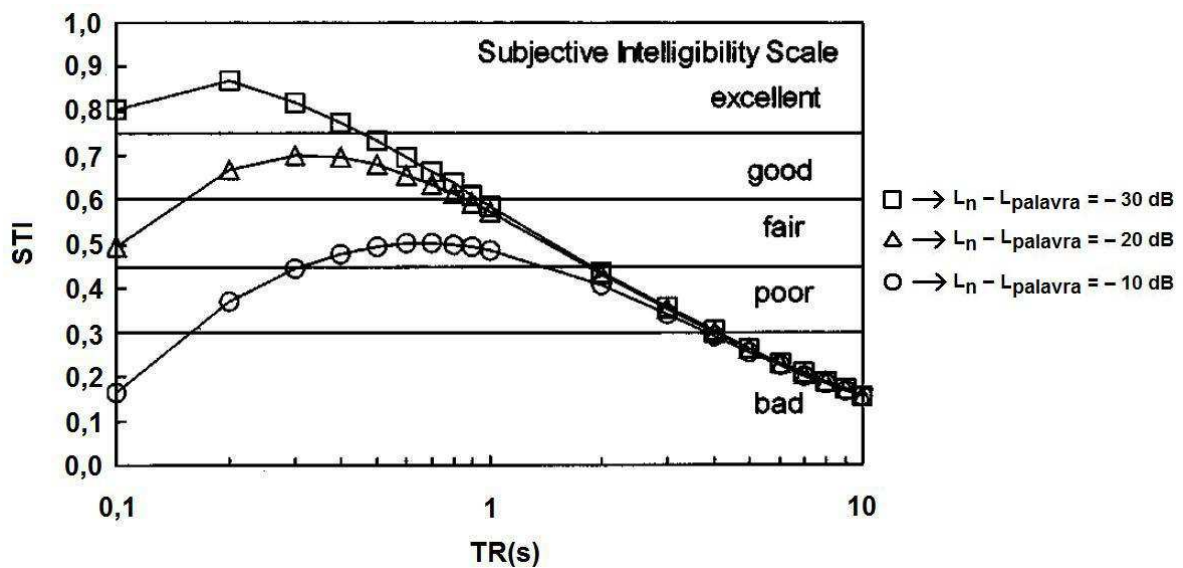


Figura 4.2 – Valores de STI em função do TR para uma sala de aula com 300 m³ [32].

Considerando a relação custo-qualidade, ou seja, para tempos de reverberação mais elevados o custo é menor, pois não é necessário utilizar muito material absorvente, assim conclui-se que é possível ser determinado o valor para o tempo de reverberação ideal para a qual a inteligibilidade é considerada “muito boa”.

Os autores deste estudo definiram que para um grau de inteligibilidade de 100% o valor de STI bastava ser superior a 0,735, ou seja, valores acima de 10% da gama *good*. Assim foi possível determinar a gama de valores que respeitam este critério (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 – TR para o qual a inteligibilidade é de 100% [adaptado de [32]].

$L_{palavra} - L_n$ (dB)	TR para inteligibilidade de 100% (s)			TR tendo em consideração o efeito económico (s)		
	Volume (m ³)					
	100	300	500	100	300	500
30	0,1 – 0,4	0,1 – 0,4	0,2 – 0,4	0,4	0,4	0,4
25	0,1 – 0,4	0,2 – 0,4	0,3	0,4	0,4	0,3
20	0,2 – 0,4	(---)	(---)	0,4	(---)	(---)
15	(---)	(---)	(---)	(---)	(---)	(---)
10	(---)	(---)	(---)	(---)	(---)	(---)

(---) impossível obter inteligibilidade “aparente” de 100%

Desta forma pode concluir-se pela análise do Quadro 4.3 que para volumes maiores seria necessário ter tempos de reverberação maiores, isto para intensificar o nível sonoro na sala. Devido à medição com outros parâmetros, Bistafa e Bradley definiram assim o tempo de reverberação recomendado compreendido entre 0,3 e 0,4 s, sendo o ótimo entre 0,1 e 0,3 s.

Em 2000 foi publicado um documento pela comissão técnica de acústica arquitetónica da Acoustical Society of America, realizado por Seep *et al.*, que apresenta indicações para a realização de escolas com aspetos acústicos adequados [33]. Segundo este documento o tempo de reverberação a utilizar em salas de aula deve ser da ordem dos 0,4 a 0,6 s, não dependendo do volume da sala.

Em 2002 foi publicada nos Estados Unidos da América a norma ANSI S12.60, sendo esta a primeira norma mundial referente a condições acústicas de salas de aula. É a partir dela que atualmente a maior parte dos profissionais se baseiam. Nela são indicados os valores limite para o ruído de fundo, para o tempo de reverberação e o valor limite aceitável de transmissão sonora entre espaços adjacentes. O tempo de reverberação considerado é referente à média aritmética dos tempos de reverberação das frequências de 500, 1000 e 2000 Hz.

Atualmente na norma americana atualizada ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 [34] referente às condições acústicas necessárias em salas de aula, é indicado que para compartimentos com volumes menores a 283 m³ devem apresentar um tempo de reverberação inferior a 0,6 s, volumes compreendidos entre os 283 m³ e os 566 m³ devem ter tempos de reverberação inferiores a 0,7 s e para volumes superiores a 566 m³ a norma não apresenta qualquer valor.

Um valor de 0,3 s (menor que os apresentados) é sugerido para situações de crianças que apresentem alguma deficiência auditiva ou outros problemas de comunicação.

A norma americana ANSI/ASA S12.60-2009/Part 2 [35] refere-se a salas de aulas temporárias, ou seja, construções leves que normalmente são utilizadas com carácter temporário (Figura 4.3) e indica que o tempo de reverberação máximo a utilizar é de 0,5 s para volumes inferiores a 283 m³ e de 0,6 s

para volumes compreendidos entre os 283 m³ e os 566 m³, sendo volumes superiores a 566 m³ indicados sem qualquer especificação.



Figura 4.3 – Exemplo de salas de aula temporárias referentes à norma ANSI/ASA S12.60-2009/Part 2 [36].

A norma alemã DIN 18041 [37] apresenta valores de referência do tempo de reverberação médio máximo das frequências de 250 a 2000 Hz para salas de aula em função do volume (equação 4.3).

$$TR = 0,32 \times \log(V) - 0,17 \quad (4.3)$$

Desta forma pode concluir-se que para os volumes habituais de salas de aula, a norma aconselha o uso de tempos de reverberação máximos de aproximadamente 0,47, 0,62 e 0,69 s para volumes de 100, 300 e 500 m³, respetivamente.

A norma suíça SIA 181 de 2006 [38], baseada na norma alemã DIN 18041, apresenta valores de referência do tempo de reverberação iguais aos anteriores.

Revendo todos os estudos apresentados é possível perceber-se que o TR máximo recomendado com carácter satisfatório, é até aos 0,7 s (Quadro 4.5).

Quadro 4.5 – Resumo do TR máximos recomendáveis segundo vários autores.

Autor	Observações	Volumes (m ³)		
		100	300	500
	SNS = 30 dB			
Hodgson e Nosal [31]	(Sem indicação das bandas de frequência)	0,9 s	0,9 s	0,9 s
Bistafa e Bradley [32]	$L_n - L_{palavra} = 25 \text{ dB}$ (Bandas de 500 a 4k Hz)	0,4 s	0,4 s	0,3 s
ANSI/ASA S12.60-2010/Part1 [34]	(Bandas de 500 a 2k Hz)	0,6 s	0,7 s	0,7 s
SIA 181 de 2006 [38]	(Bandas de 250 a 2k Hz)	0,5 s	0,6 s	0,7 s
DIN 18041 de 2004 [37]	(Bandas de 250 a 2k Hz)	0,5 s	0,6 s	0,7 s

No capítulo 5 são apresentados valores legislativos de alguns países, que serão usados como comparação com os resultados obtidos no caso de estudo realizado.

5

VALORES DE REFERÊNCIA

5.1. LEGISLAÇÃO

5.1.1. PORTUGAL

Em 1982 surge nos Açores o primeiro texto legislativo português dirigido à acústica, sendo este documento realizado para controlar os ruídos na vizinhança de edifícios hospitalares e escolares [39].

Apenas em 1987 surge no continente o “Regulamento Geral sobre o Ruído”, pelo decreto-lei 251/87 [40]. Este regulamento sofreu já várias atualizações sendo o mais atual o DL 09/07, destina-se a medir todos os níveis de ruído limites no território português [41].

Em 2006 surge o decreto-lei DL 182/06 referente à exposição dos trabalhadores ao ruído [42]. Este documento quantifica a “dose” diária de ruído que os trabalhadores deveriam estar no limite sujeitos.

Entre outros documentos que foram surgindo, em 2002 foi realizado um documento que especifica as características acústicas que deverão possuir os diversos tipos de edifícios, sendo intitulado por “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios” (RRAE), segundo o decreto-lei 129/02 [43]. Após sucessivas atualizações surge em 2008 o atual decreto-lei 96/2008 [44].

Para o presente trabalho apenas se torna necessário analisar o artigo 7º do RRAE de 2008, que especifica os seguintes requisitos acústicos para edifícios escolares e similares, e de investigação [44]:

1. *O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior dos edifícios e os compartimentos interiores identificados no Quadro 5.1, devem satisfazer o seguinte:*
 - i. *$D_{2m,nT,w} \geq 33 \text{ dB}$, em zonas mistas ou em zonas sensíveis onde está prevista a construção de uma grande infraestrutura de transporte;*
 - ii. *$D_{2m,nT,w} \geq 28 \text{ dB}$, em zonas sensíveis.*
 - iii. *Quando a área translúcida for superior a 60% do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação apropriado, C ou C_{tr} conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites das subalíneas i) e ii);*
2. *O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, entre locais do edifício, deve satisfazer as condições indicadas no Quadro 5.1.*

Quadro 5.1 – Valores limite mínimos de $D_{nT,w}$, entre locais do edifício, segundo o RRAE [44].

Locais de emissão \ Locais de receção	Salas de aula (*), de professores, administrativas	Bibliotecas e gabinetes médicos	Salas polivalentes e berçários
Salas de aula, de professores, administrativas	≥ 45	≥ 45	≥ 45
Salas de aula musical, salas polivalentes, refeitórios, ginásios e oficinas	≥ 55	≥ 58	≥ 50
Berçários	≥ 53	≥ 55	≥ 48
Corredores de grande circulação (**)	≥ 30	≥ 35	≥ 30

(*) Incluindo salas de aula musical;

(**) Considerando que haverá porta de comunicação com os locais recetores, se tal não for o caso, os valores indicados serão acrescidos de 15 dB.

3. No interior dos locais de receção definidos no Quadro 5.1, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, provenientes de percussão normalizada sobre pavimentos de outros locais de edifício, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte:
 - i. $L'_{nT,w} \leq 60$ dB, se o local emissor for de grande circulação, ginásio, refeitório ou oficina;
 - ii. $L'_{nT,w} \leq 65$ dB, se o local for salas de aulas, berçário ou salas polivalentes;
4. No interior dos locais que constem no Quadro 5.2, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação, TR , correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deve satisfazer as condições indicadas no referido quadro;

Quadro 5.2 – Tempo de reverberação, segundo o RRAE [44]

Locais	Tempo de reverberação (500 – 2k Hz) [s]
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	$TR \leq 0,15 \times V^{1/3}$

V – Volume do espaço em causa (m^3).

5. O paramento interior da envolvente dos átrios e corredores de grande circulação deve ser dotado de revestimentos absorventes sonoros, cuja área de absorção sonora equivalente, A (m^2), correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, seja maior ou igual a 25% da superfície de pavimento dos locais considerados;

6. No interior dos locais de receção indicados no Quadro 5.1 o nível de avaliação $L_{Ar,nT}$, do ruído particular de equipamentos do edifício deve satisfazer as condições indicadas no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Níveis de $L_{Ar,nT}$ limite, segundo o RRAE [44].

Locais	Nível de avaliação, $L_{Ar,nT}$ (dB) \leq
Biblioteca	35, se em funcionamento intermitente
	30, se em funcionamento contínuo
Restantes locais de receção indicados no Quadro 5.1	40, se em funcionamento intermitente
	35, se em funcionamento contínuo

Considera-se que um edifício se encontra conforme o RRAE se apresentar cumulativamente os seguintes resultados:

- O valor obtido de $D_{2m,nT,w}$ ou $D_{nT,w}$ acrescido de 3 dB, satisfaça os limites regulamentares;
- O valor obtido de $L'_{nT,w}$ diminuído de 3 dB, satisfaça os limites regulamentares;
- O valor obtido de $L_{Ar,nT}$ diminuído de 3 dB(A), satisfaça os limites regulamentares;
- O valor obtido de TR diminuído de 25% do limite regulamentar, satisfaça os limites regulamentares.

5.1.2. OUTROS PAÍSES

Neste subcapítulo será evidenciado apenas os requisitos acústicos em relação ao tempo de reverberação de diversos países, não sendo apresentado qualquer outro parâmetro pois ficaria fora do âmbito deste trabalho.

Em Espanha e segundo o Real Decreto 1371/2007, de 19 de Outubro ficou aprovado o documento básico “*DB-HR Protección frente al ruido*” [45]. Este documento tem o objetivo de estabelecer regras e procedimentos que permitam cumprir as exigências básicas em relação ao ruído. Neste documento são apresentados os valores limites do tempo de reverberação a utilizar em diversos espaços, sendo eles apresentados no Quadro 5.4.

A norma apresenta valores máximos admissíveis de salas de aulas apenas para volumes menores que os 350 m³, volumes superiores ao indicado deverão ser alvo de um estudo mais pormenorizado quanto à sua conceção, não sendo fornecido qualquer valor limite.

Para locais correntes, essa legislação indica que deve ser utilizado material absorvente suficiente para que garanta uma absorção sonora equivalente (A) igual ou maior a 20% do volume do espaço.

Quadro 5.4 – Tempo de reverberação, segundo legislação espanhola DB-HR [45].

Local	Tempo de reverberação, TR máximo (500 – 2k Hz) [s]
Sala de aula e de conferência, sem ocupação nem mobiliário (Volume $\leq 350 \text{ m}^3$)	0,7
Sala de aula e de conferência, sem ocupação mas com mobiliário (Volume $\leq 350 \text{ m}^3$)	0,5

Em França, segundo o decreto de 25 de Abril de 2003 [46], são estabelecidos os limites de ruído e requisitos técnicos para instituições de ensino. Nele é definido o tempo de reverberação a utilizar em diversos espaços dedicados ao ensino segundo o artigo 5º, sendo os seus valores expressos no Quadro 5.5 para locais mobilados e desocupados.

Quadro 5.5 – Tempo de reverberação, segundo decreto francês de 25 de Abril de 2003 [46].

Local	Tempo de reverberação, TR (500 – 2k Hz) [s]
Infantários: salas de repouso, salas de exercício e salas de jogos;	
Locais de ensino, de música, de estudos, atividades práticas, restaurantes/cantinas e salas multiusos com $V \leq 250 \text{ m}^3$	$0,4 \leq TR \leq 0,8$
Locais de ensino, de música, de estudos, atividades práticas com $V > 250 \text{ m}^3$, exceto oficinas (*)	$0,6 \leq TR \leq 1,2$
Salas multiusos com $V > 250 \text{ m}^3$ (**)	$0,6 \leq TR \leq 1,2$ (***)
Outros locais acessíveis aos alunos com $V > 250 \text{ m}^3$	$\leq 1,2$ se $250 \text{ m}^3 \leq V \leq 512 \text{ m}^3$ $\leq 0,15\sqrt[3]{V}$ se $V > 512 \text{ m}^3$

(*) Conforme artigo 8;

(**) Caso o restaurante/cantina seja usada como multiusos, os valores a utilizar são os da sala de refeições;

(***) É obrigatório um estudo particular para que a sala apresente uma boa inteligibilidade da palavra;
V Volume do espaço.

Na Suécia foi implementada em 2007 a norma SS 25268 [47] onde são especificados os requisitos que devem ser utilizados no isolamento do ruído por condução aérea, isolamento sonoro de percussão, nível de ruído no interior das instalações, nível de ruído de tráfego, tempo de reverberação, entre outros. Os tipos de locais abrangidos pela norma são: instalações de saúde, escolas, ATL, escritórios e hotéis. Para cada tipo de local já referidos são apresentados classes de valores em função da sua qualidade acústica. A classe varia de A a D, sendo a classe A a de melhor qualidade acústica e a D a de pior. Dado a classe C corresponder à maioria dos casos, será aqui apresentado apenas os valores do tempo de reverberação para esta classe (Quadro 5.6).

Quadro 5.6 – Tempo de reverberação, segundo norma sueca SS 25268 [adaptado de [47]].

Instalação	Local	Tempo de reverberação, TR máximo (250 – 4k Hz) [s]
Escolas, creches, ATL	Salas de aula	0,5
	Salas de música	0,6
	Escritórios, bibliotecas	0,6
	Corredores, entradas	0,5
	Escadarias	0,8
Ensino secundário e superior	Salas de aula	0,6
	Salas de música	0,8
	Escritórios, bibliotecas	0,6
	Corredores, entradas	0,8
	Escadarias	1,5

No Reino Unido foi apresentado em 2003 o *Building Bulletin* 93 (ou BB 93) que veio substituir o antigo *Building Bulletin* 87 (ou BB 87). Este novo documento é agora de carácter obrigatório quando comparado com o antigo BB 87, sendo nele apresentando os limites dos tempos de reverberação a utilizar (Quadro 5.7) [48].

Quadro 5.7 – Tempo de reverberação, segundo norma inglesa BB 93 [adaptado de [48]].

Locais	Tempo de reverberação, TR máximo (500 – 2k Hz) [s]
Ensino fundamental: Salas de aula normais	0,6
Ensino Secundário: Salas de aula normais	0,8
Salas de leitura pequenas (menos de 50 pessoas)	0,8
Salas de leitura grandes (mais de 50 pessoas)	1,0
Salas de aula para alunos com problemas auditivos	0,4
Salas de estudo	0,8
Bibliotecas	1,0
Salas multiusos	0,8 – 1,2
Corredores, átrios	1,5

Em Junho de 2012 foi publicado na Noruega a norma NS 8175 [49]. Esta norma surge de uma atualização da antiga norma NS 8175:2008, sendo nela apresentados os requisitos mínimos acústicos a existir nos diversos edifícios.

Em relação ao tempo de reverberação a norma NS 8175:2012 indica que o seu valor (em segundos) deve ser inferior a 20% da altura da sala (em metros). Para locais onde o pé direito é variável (por exemplo anfiteatros) deve ser usado o valor médio entre a altura máxima e mínima da sala. No entanto esta norma indica que caso o valor seja superior ao regulamentar da antiga norma NS 8175:2008, então o valor deverá ser adotado pela antiga norma [49]. A norma antiga é idêntica à norma da Suécia sendo os valores avaliados por classes de A a D, sendo o C o valor utilizado como limite para a nova norma [50]. O Quadro 5.8 apresenta os resultados segundo a norma Norueguesa.

Quadro 5.8 – Tempo de reverberação máximos nas frequências médias de 125 Hz a 2 kHz, segundo norma norueguesa antiga e nova [adaptado de [49] e [50]].

Norma	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
NS 8175:2008	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$
NS 8175:2012	$\leq 0,2 \times \text{altura média da sala (m)}$, resultado tem de ser inferior a 0,6 s			

Como forma de resumo o Quadro 5.9 apresenta os vários limites de tempos de reverberação para salas de aula normais segundo as várias legislações e normas já aqui apresentadas.

Como é possível verificar já é raro existir uma avaliação do tempo de reverberação em função do volume. Nos casos apresentados apenas a Alemanha, Portugal e Suíça dependem diretamente do volume do espaço. Os restantes países apresentados exigem/aconselham tempos de reverberação menores que 0,6 ou 0,8 s.

Quadro 5.9 – Resumo de limites legislativos e normas de vários países

País/Fonte	Gama de frequências em análise	Tempo de reverberação, TR (s)
Alemanha / DIN 18041 [37]	250 a 2k Hz (4 bandas)	$\leq 0,32 \times \log(V) - 0,17$ Exemplo: $\leq 0,6$ se $V=200 \text{ m}^3$
Espanha / DB-HR [45]	500 a 2k Hz (3 bandas)	$\leq 0,5$
EUA / ANSI/ASA S12,60-2010 [34]	500 a 2k Hz (3 bandas)	$\leq 0,6$ se $V < 283 \text{ m}^3$ $\leq 0,7$ se $283 \leq V \leq 566 \text{ m}^3$
França / Decreto de 25/04/2003 [46]	500 a 2k Hz (3 bandas)	$0,4 \leq TR \leq 0,8$ se $V \leq 250 \text{ m}^3$ $0,6 \leq TR \leq 1,2$ se $V > 250 \text{ m}^3$
Noruega / NS 8175 [49]	125 a 2k Hz (5 bandas)	$\leq 0,2 \times \text{altura média da sala}$ Exemplo: $\leq 0,6$ se altura=2,8 m
Portugal / RRAE [44]	500 a 2k Hz (3 bandas)	$\leq 0,15 \times V^{1/3}$ Exemplo: $\leq 0,9$ se $V=200 \text{ m}^3$
Reino Unido / BB 93 [48]	500 a 2k Hz (3 bandas)	$\leq 0,6$ para ensino primário $\leq 0,8$ para ensino secundário
Suécia / SS 25268 [47]	250 a 4k Hz (5 bandas)	$\leq 0,5$ para ensino primário $\leq 0,6$ para ensino secundário
Suíça / SIA 181 [38]	250 a 2k Hz (4 bandas)	$\leq 0,32 \times \log(V) - 0,17$ Exemplo: $\leq 0,6$ se $V=200 \text{ m}^3$

5.2. VALORES IDEAIS

No capítulo 4 são apresentados vários estudos e normas utilizadas, de carácter bastante específico em relação ao tempo de reverberação. Neles é analisada a influência do tempo de reverberação na inteligibilidade da palavra, concluindo-se que tempos de reverberação elevados trazem inteligibilidade da palavra mais reduzida.

Ainda no mesmo capítulo é possível compreender que o tempo de reverberação próximo de 0 s também prejudica a inteligibilidade, isto porque não são aproveitadas as reflexões que intensificam o nível de pressão sonora do orador. Concluiu-se portanto que para uma perfeita inteligibilidade e independentemente do volume do espaço, as salas de aula onde a função da inteligibilidade da palavra é primordial necessitam de possuir um tempo de reverberação entre 0,3 e 0,4 s.

Dado a influência da palavra ser mais importante no ensino primário que o ensino secundário, isto porque aqui os alunos já possuem um maior campo lexical, quando comparado com o ensino primário, compreende-se que mais elevados valores do tempo de reverberação sejam possíveis de ser utilizados.

Desta forma, valores até 0,6 s não acarretariam um grande problema na inteligibilidade da palavra e traria um menor custo de materiais.

Assim, aconselha-se que sejam utilizados tempos de reverberação de 0,3 ou 0,4 s para o ensino primário e locais onde exista pessoas com alguma reduzida capacidade auditiva, e tempos compreendidos entre 0,3 a 0,6 s para os restantes locais onde a inteligibilidade da palavra é importante.

Valores muito baixos do tempo de reverberação podem provocar sonolência nos alunos devido ao reduzido ruído de fundo que à partida estará presente. Desta forma uma sala de aula bastante inteligível pode tornar-se numa verdadeira sala de repouso com elevadas condições para tal. Assim, valores um pouco mais elevados podem ser utilizados, para que a sala de aula não seja tão monótona (até + 0,2 s).

Este ligeiro aumento do tempo de reverberação irá provocar uma pequena diminuição da inteligibilidade, criando efeitos benéficos no sentido da eliminação da sonolência mas piorando a capacidade de expressão dos docentes e de entendimento por parte dos alunos.

Por forma a ajudar e não criar uma maior dificuldade a docentes admite-se que as salas de aula do ensino primário possam apresentar um tempo de reverberação médio máximo de 0,5 s e de 0,7 s para os restantes locais onde a inteligibilidade da palavra é também importante, tal como escolas de ensino secundário ou superior. Locais para pessoas com dificuldades auditivas deveram manter-se os valores já apresentados de 0,3 ou 0,4 s.

Ao respeitarem-se os valores ideais do tempo de reverberação, estará á partida assegurada um bom valor de RASTI. No entanto, as salas de aulas deveriam apresentar um valor de RASTI igual ou superior a 0,60, ou seja a uma classificação subjetiva de “boa inteligibilidade”.

6

CASO DE ESTUDO

6.1. CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS

O dia de 27 de Setembro de 1996 ficou marcado como o dia em que foi lançada a primeira pedra para aquilo que é hoje atualmente a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto da autoria dos arquitetos Pedro Ramalho e Luís Ramalho. A faculdade foi inaugurada no dia 22 de Março de 2001 com a presença do Presidente da República Jorge Sampaio. Na altura da sua inauguração a faculdade era composta por treze blocos distintos, sendo cada um representado pelas letras de A a N (Figura 6.1). Atualmente já existem edifícios que foram realizados posteriormente, aumentando desta forma a capacidade da faculdade em serviços, tais como cantinas, bares, centros de investigação, entre outros.

O bloco B destina-se preferivelmente a salas de aulas, e foi neste bloco que foi realizado o caso de estudo (Figura 6.1).

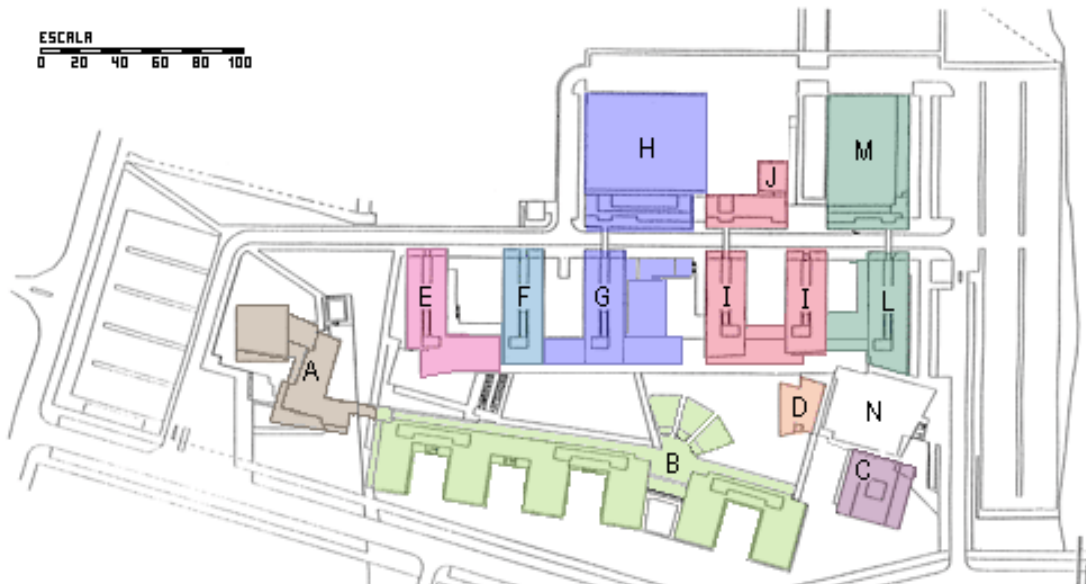






Figura 6.1 – Planta da FEUP na data da sua construção [51].

Para o efeito foram avaliadas oito salas de aula com diferentes características arquitetónicas, sendo cinco delas em forma de anfiteatro e as restantes de forma comum (Quadro 6.1).

A numeração das salas é feita por uma letra e um número de três dígitos (exemplo: B 012). A letra corresponde ao bloco a que a sala pertence, o primeiro algarismo corresponde ao piso e os dois restantes algarismos correspondem ao número da sala. Ou seja para o exemplo B 012, trata-se da décima segunda sala situada no piso zero do bloco B.

As diversas características das salas onde foram realizadas as medições são apresentadas no Quadro 6.1, sendo possível identificar-se as diferenças entre cada uma das salas. A medição dos comprimentos das salas foi realizada com auxílio do um medidor digital *DLE 40* da *BOSCH*.

Quadro 6.1 – Descrição das várias salas em estudo na FEUP.

Sala	Comp. (m)	Larg. (m)	Altura média (m)	Área (m ²)	V (m ³)	Lotação (unidades)	Fotografia (observações)
B 002	13,9	10,9	4,19	152	607	184	
B 018	8,88	6,36	2,99	56,5	169	60	
B 023	12,9	6,93	3,90	89,5	349	99	
B 027	8,5	6,97	2,93	59,2	173	53	

Sala	Comp. (m)	Larg. (m)	Altura média (m)	Área (m ²)	V (m ³)	Lotação (unidades)	Fotografia (observações)
B 032	11,6	6,96	3,89	80,5	313	88	 <p>Sala acusticamente tratada (*)</p>
B 221	24,4	6,93	2,71	168	456	89	 <p>Sala de exames</p>
B 333	7,08	6,95	2,73	49,2	134	21	
B 334	10,3	6,94	2,73	70,5	192	34	

(*) Alcatifa em todo o piso; teto e parede de fundo revestida com material absorvente; janelas com tratamento acústico nas caixilharias; cadeiras almofadadas; uma antecâmara que separa a sala do exterior, ajudando na atenuação do ruído proveniente dos corredores e um óculo envidraçado na porta que possibilita a visão para o interior.

6.2. METODOLOGIA

6.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS

Tendo em vista caracterizar as salas de aula em relação ao tempo de reverberação e à inteligibilidade da palavra e posteriormente comparar os resultados obtidos com valores legislativos nacionais e internacionais, foram medidos, de acordo com normas existentes, os valores de RASTI e do TR nas oito salas apresentadas no Quadro 6.1.

6.2.2. METODOLOGIA DO TRABALHO

As medições foram realizadas nos dias 18, 19 e 24 de Abril de 2013 entre as 15:00 e as 20:00 h.

Os valores obtidos do tempo de reverberação e RASTI para uma determinada sala foram obtidos sempre no mesmo dia, sendo normalmente medido primeiramente o tempo de reverberação da sala e posteriormente os valores de RASTI. Considerando-se assim as condições atmosféricas iguais.

A avaliação do tempo de reverberação foi efetuada com auxílio do sonómetro Brüel & Kjær 2260 (Figura 6.2) e um emissor Brüel & Kjær 4224 (Figura 6.3). Estes dois aparelhos são ligados um ao outro, desta forma o sonómetro capta o ruído de fundo da sala e “ordena” que a fonte emita um ruído branco com um nível de potência sonora suficiente (aproximadamente +60 dB que o ruído de fundo) para que o sonómetro seja capaz de determinar o tempo de reverberação provocado por um decaimento de 30 dB, sendo o resultado automaticamente apresentado em relação ao valor padrão correspondente a um decaimento de 60 dB, para as bandas de frequência de oitava compreendidas entre os 63 e os 8000 Hz. Durante o tempo de medição apenas se encontravam presentes o operador do sonómetro e o autor deste trabalho.



Figura 6.2 – Sonómetro Brüel & Kjær 2260
[Fotografia do autor]



Figura 6.3 – Emissor Brüel & Kjær 4224
[Fotografia do autor]

O emissor (F) foi sempre colocado ao eixo longitudinal da sala e o sonómetro foi variando entre três posições distintas (1, 2, 3), conforme Figura 6.4. Em cada ponto do sonómetro foram realizadas duas leituras com o sonómetro orientado em 30° e -30° em relação ao eixo longitudinal da sala, estando a uma altura aproximada de 1,30 m do piso.

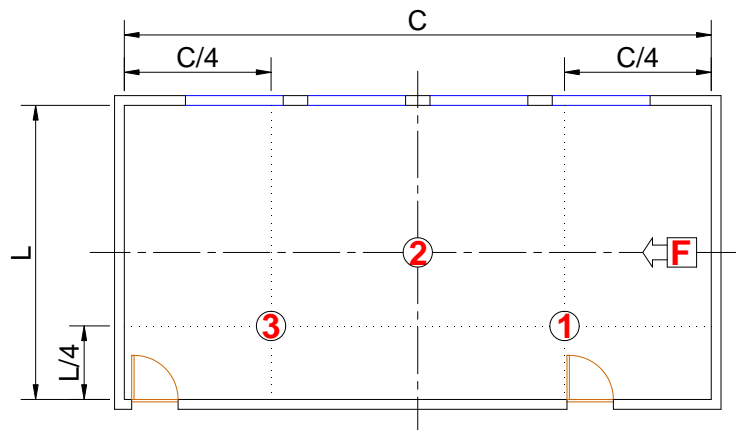


Figura 6.4 – Posicionamento dos aparelhos para medição do TR, sendo F a posição do emissor e os números de 1 a 3 as várias posições do sonómetro.

A avaliação do RASTI foi realizada com auxílio do equipamento Brüel & Kjær 3361, composto por um emissor Brüel & Kjær 4225 (Figura 2.21) e um recetor Brüel & Kjær 4419 (Figura 2.22).

O emissor (F) colocado no eixo longitudinal da sala, na posição mais comum do orador, emitia um sinal sonoro característico nas frequências de 500 e 2000 Hz (foi utilizado um nível de intensidade sonora de referência +10 dB, para que o ruído de fundo existente nos corredores não interferisse com os resultados).

O posicionamento tipo dos aparelhos para cada sala pode ser verificado na Figura 6.5. O recetor foi colocado em seis pontos distintos da sala (1 a 6), sendo adotada uma medição simples de 8 s. Para cada ponto foram realizadas três medições, no entanto sempre que se verificasse uma variação abrupta dos resultados era realizado mais uma medição, obtendo-se desta forma quatro valores para o mesmo ponto.

Durante as medições encontravam-se na sala o operador do equipamento e o autor deste trabalho.

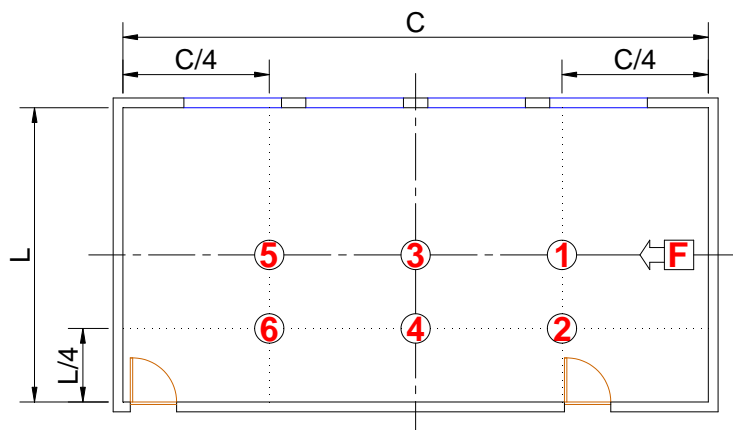


Figura 6.5 – Posicionamento tipo dos aparelhos para medição do RASTI, sendo F a posição do emissor e os números de 1 a 6 as várias posições do recetor.

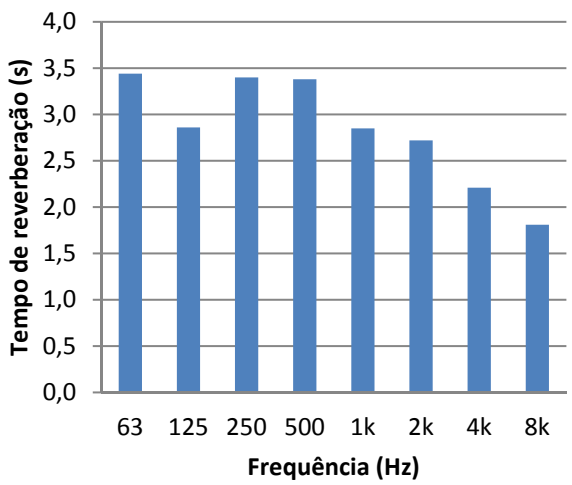
6.3. RESULTADOS

6.3.1. SALA B 002

A medição da sala B 002 foi realizada no dia 24/04/2013 pelas 17:10 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.2 e 6.3 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 20 °C e a uma humidade relativa de 62%.

Quadro 6.2 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 002.

Frequência (Hz)	Pontos de medição			Média (s)
	1	2	3	
63	2,99	3,26	4,08	3,44
125	2,72	2,49	3,36	2,86
250	3,35	3,34	3,5	3,40
500	3,34	3,44	3,35	3,38
1k	2,81	2,85	2,89	2,85
2k	2,73	2,68	2,74	2,72
4k	2,21	2,27	2,16	2,21
8k	1,79	1,83	1,81	1,81



TR médio (500 a 2k Hz) = 3,0 s	TR médio (125 a 2k Hz) = 3,0 s
TR médio (250 a 2k Hz) = 3,1 s	TR médio (250 a 4k Hz) = 2,9 s

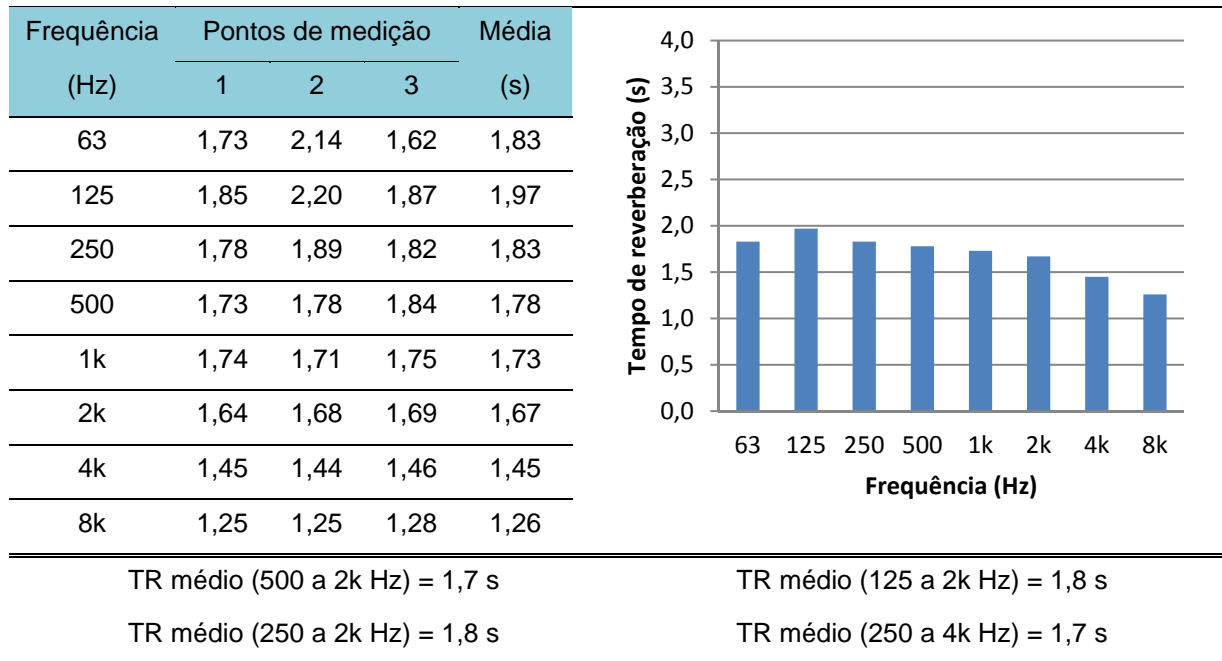
Quadro 6.3 – Resultados do RASTI para a sala B 002.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,47	0,46	0,46	0,45	0,46	0,41
2	0,42	0,41	0,42	0,42	0,42	
3	0,40	0,41	0,39		0,40	
4	0,38	0,37	0,39	0,40	0,39	
5	0,38	0,36	0,39	0,38	0,38	
6	0,39	0,40	0,38	0,39	0,39	

6.3.2. SALA B 018

A medição da sala B 018 foi realizada no dia 18/04/2013 pelas 20:50 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.4 e 6.5 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 19 °C e a uma humidade relativa de 67%.

Quadro 6.4 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 018.



Quadro 6.5 – Resultados do RASTI para a sala B 018.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,50	0,50	0,49		0,50	0,50
2	0,49	0,51	0,51		0,50	
3	0,49	0,49	0,49		0,49	
4	0,49	0,48	0,50		0,49	
5	0,49	0,50	0,49		0,49	
6	0,49	0,51	0,50		0,50	

6.3.3. SALA B 023

A medição da sala B 023 foi realizada no dia 18/04/2013 pelas 19:55 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.6 e 6.7 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 19 °C e a uma humidade relativa de 66%.

Quadro 6.6 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 023.

Frequência (Hz)	Pontos de medição			Média (s)
	1	2	3	
63	3,01	2,99	2,92	2,97
125	2,46	2,52	2,53	2,50
250	2,63	2,57	2,58	2,59
500	2,44	2,38	2,42	2,41
1k	2,27	2,27	2,23	2,26
2k	2,21	2,23	2,20	2,21
4k	2,00	1,97	1,98	1,98
8k	1,64	1,68	1,67	1,66

Frequência (Hz)	TR médio (s)
500 a 2k Hz	2,3 s
125 a 2k Hz	2,4 s
250 a 2k Hz	2,4 s
250 a 4k Hz	2,3 s

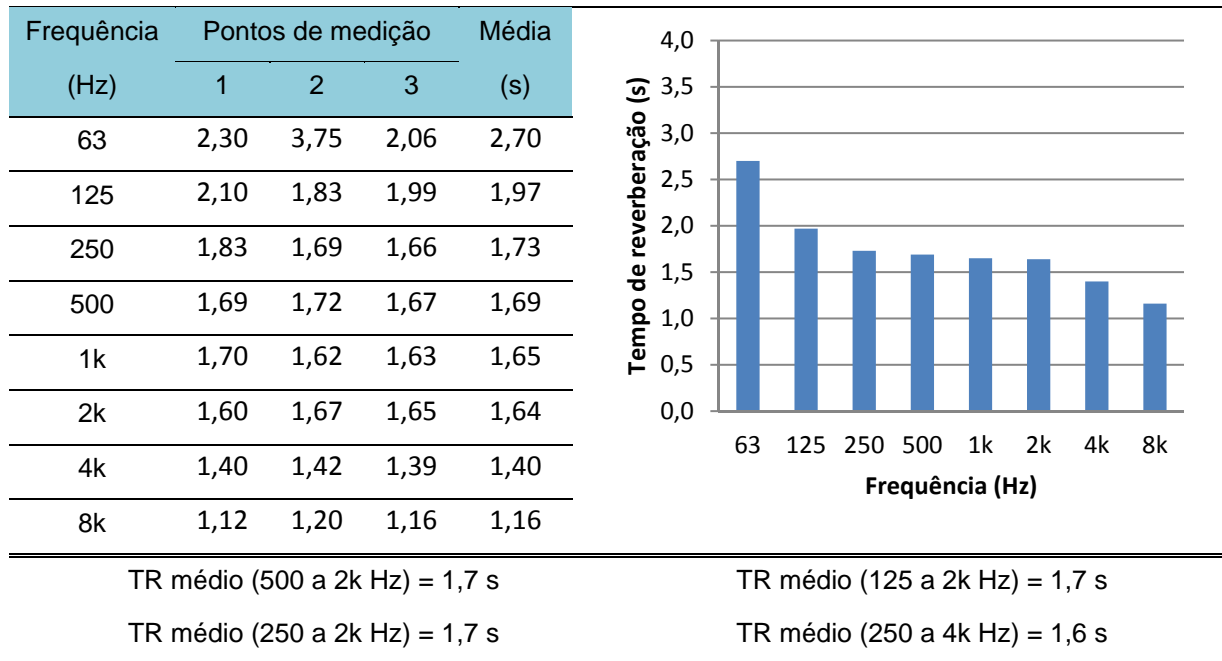
Quadro 6.7 – Resultados do RASTI para a sala B 023.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,50	0,52	0,51		0,51	0,45
2	0,47	0,47	0,45	0,46	0,46	
3	0,45	0,45	0,44		0,45	
4	0,44	0,45	0,44		0,44	
5	0,42	0,42	0,40		0,41	
6	0,44	0,44	0,44		0,44	

6.3.4. SALA B 027

A medição da sala B 027 foi realizada no dia 19/04/2013 pelas 18:20 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.8 e 6.9 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 19 °C e a uma humidade relativa de 56%.

Quadro 6.8 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 027.



Quadro 6.9 – Resultados do RASTI para a sala B 027.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,57	0,56	0,56		0,56	0,50
2	0,48	0,49	0,51		0,49	
3	0,49	0,50	0,50		0,50	
4	0,49	0,49	0,48		0,49	
5	0,46	0,46	0,46	0,47	0,46	
6	0,48	0,49	0,48	0,49	0,49	

6.3.5. SALA B 032

A medição da sala B 032 foi realizada no dia 19/04/2013 pelas 15:55 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.10 e 6.11 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 19 °C e a uma humidade relativa de 56%. Esta sala apresenta já tratamento acústico.

Quadro 6.10 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 032.

Frequência (Hz)	Pontos de medição			Média (s)
	1	2	3	
63	1,93	2,06	1,63	1,87
125	0,93	0,99	1,02	0,98
250	0,81	0,87	0,89	0,86
500	0,69	0,71	0,64	0,68
1k	0,58	0,57	0,59	0,58
2k	0,48	0,48	0,51	0,49
4k	0,50	0,50	0,52	0,51
8k	0,48	0,52	0,55	0,52

Frequency Range (Hz)	TR médio (s)
500 a 2k Hz	0,6 s
125 a 2k Hz	0,7 s
250 a 2k Hz	0,7 s
250 a 4k Hz	0,6 s

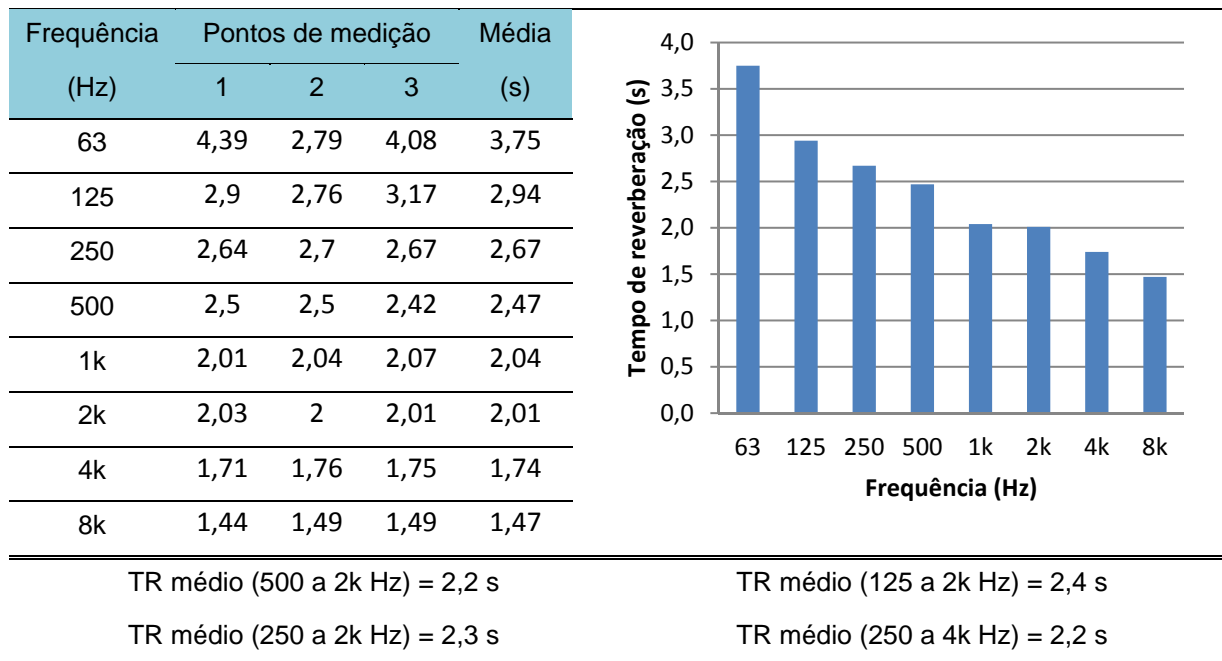
Quadro 6.11 – Resultados do RASTI para a sala B 032.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,83	0,83	0,83		0,83	0,77
2	0,77	0,77	0,79		0,78	
3	0,76	0,76	0,78		0,77	
4	0,76	0,76	0,77		0,76	
5	0,73	0,74	0,74	0,76	0,74	
6	0,78	0,75	0,77	0,77	0,77	

6.3.6. SALA B 221

A medição da sala B 221 foi realizada no dia 18/04/2013 pelas 17:30 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.12 e 6.13 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 20 °C e a uma humidade relativa de 64%.

Quadro 6.12 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 221.



Quadro 6.13 – Resultados do RASTI para a sala B 221.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,55	0,55	0,56		0,55	0,48
2	0,53	0,51	0,52		0,52	
3	0,46	0,48	0,47		0,47	
4	0,46	0,46	0,48		0,47	
5	0,45	0,46	0,44		0,45	
6	0,44	0,43	0,42		0,43	

6.3.7. SALA B 333

A medição da sala B 333 foi realizada no dia 18/04/2013 pelas 16:15 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.14 e 6.15 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 20 °C e a uma humidade relativa de 63%.

Quadro 6.14 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 333.

Frequência (Hz)	Pontos de medição			Média (s)
	1	2	3	
63	3,68	3,53	3,11	3,44
125	2,18	2,11	2,13	2,14
250	2,01	1,82	1,90	1,91
500	1,95	1,95	1,87	1,92
1k	1,78	1,72	1,72	1,74
2k	1,75	1,74	1,75	1,75
4k	1,55	1,49	1,51	1,52
8k	1,29	1,27	1,30	1,29

Frequência (Hz)	TR médio (s)
500 a 2k Hz	1,8 s
125 a 2k Hz	1,9 s
250 a 2k Hz	1,8 s
250 a 4k Hz	1,8 s

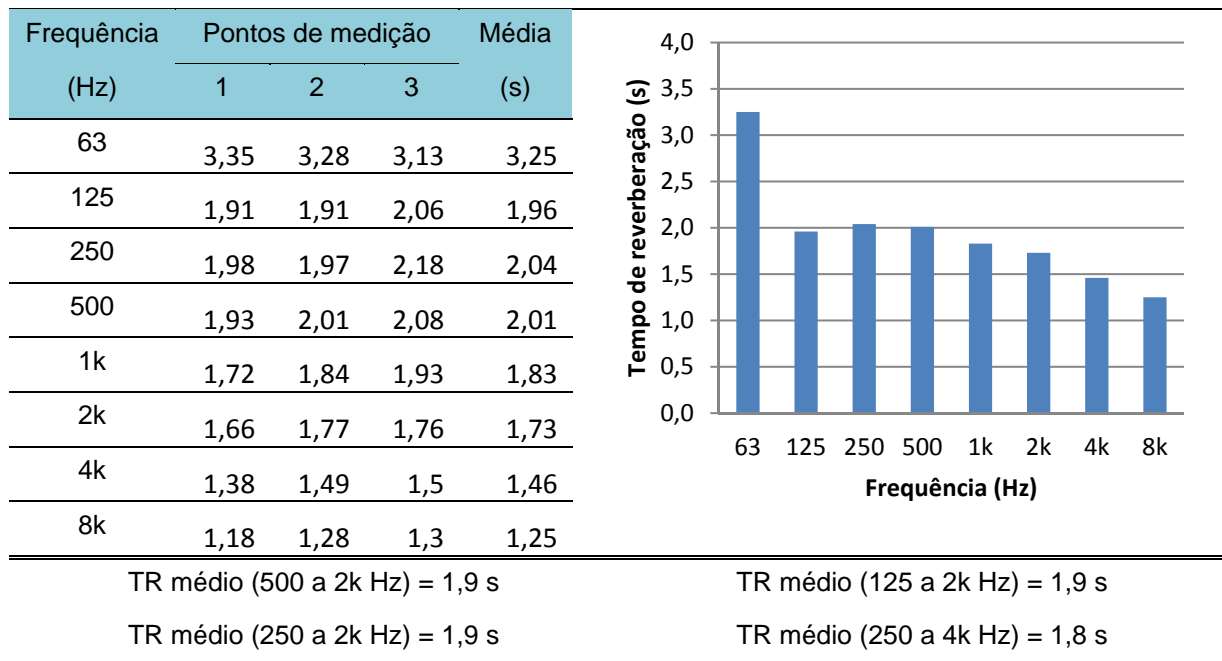
Quadro 6.15 – Resultados do RASTI para a sala B 333.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,56	0,57	0,56		0,56	0,50
2	0,52	0,52	0,51		0,52	
3	0,49	0,49	0,48		0,49	
4	0,47	0,49	0,47	0,47	0,48	
5	0,47	0,47	0,49		0,48	
6	0,46	0,48	0,48		0,47	

6.3.8. SALA B 334

A medição da sala B 334 foi realizada no dia 18/04/2013 pelas 17:00 h, sendo os resultados obtidos presentes nos quadros 6.16 e 6.17 (o primeiro referente ao tempo de reverberação e o segundo ao RASTI). A sala encontrava-se a 20 °C e a uma humidade relativa de 64%.

Quadro 6.16 – Resultados do tempo de reverberação para a sala B 334.



Quadro 6.17 – Resultados do RASTI para a sala B 334.

Pontos	Medição				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,58	0,59	0,58		0,58	0,50
2	0,50	0,52	0,52		0,51	
3	0,52	0,51	0,50		0,51	
4	0,48	0,48	0,48		0,48	
5	0,47	0,46	0,48		0,47	
6	0,45	0,45	0,45		0,45	

6.3.9. ANÁLISE GLOBAL

Como forma de resumo a Figura 6.6 apresenta os resultados dos tempos de reverberação médios (frequências de 500 a 2000 Hz) e na Figura 6.7 são apresentados os valores de RASTI médios obtidos nas oito salas.

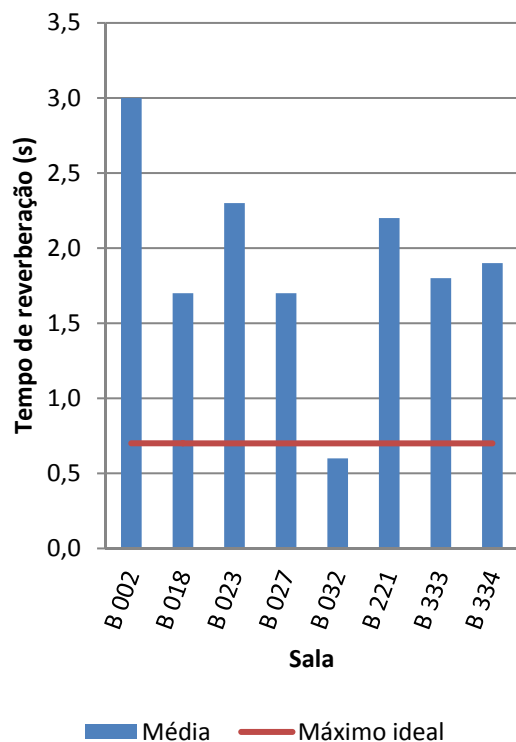


Figura 6.6 – Resumo do TR médio (500 a 2k Hz) das oito salas medidas.

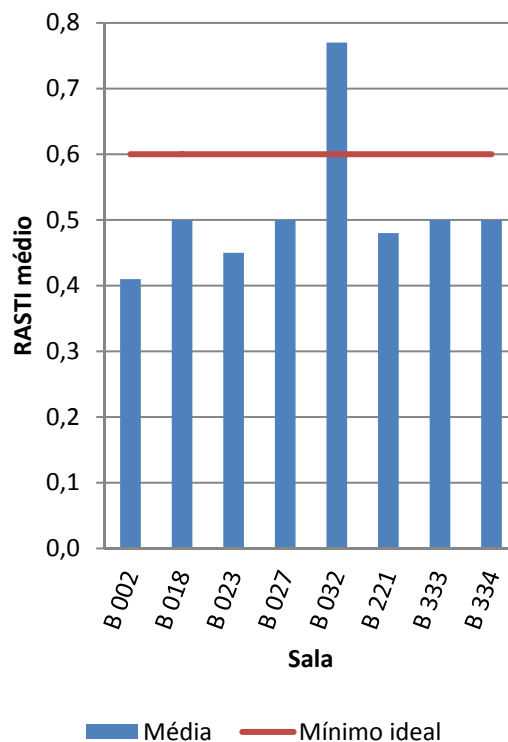


Figura 6.7 – Resumo do RASTI médio das oito salas medidas.

6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados de todas as salas, com exceção da sala B 032 e da sala B 002, apresentam uma classificação subjetiva da inteligibilidade da palavra de “Razoável”, embora perto do seu limite máximo (0,45). A sala B 032 apresenta uma classificação subjetiva da inteligibilidade da palavra de “Excelente” e a sala B 002 é a pior, apresentando uma classificação subjetiva da inteligibilidade da palavra de “Fracas” (Quadro 6.18). Tais classificações devem-se aos tempos de reverberação apresentados para cada caso.

Quadro 6.18 – Classificação subjetiva da inteligibilidade da palavra para as várias salas em estudo.

Sala	RASTI médio	Classificação subjetiva
B 002	0,41	Fracas
B 018	0,50	Razoável
B 023	0,45	Razoável
B 027	0,50	Razoável
B 032	0,77	Excelente
B 221	0,48	Razoável
B 333	0,50	Razoável
B 334	0,50	Razoável

Os valores de RASTI obtidos nas salas B 002, B 018, B 023, B 027 e B 032, ou sejam salas tipo anfiteatro, apresentam uma melhoria no ponto 6 quando comparado com os pontos adjacentes 4 e 5. Isto deve-se ao facto de a sala apresentar nestes locais uma maior proximidade com o teto e com a parede lateral, sendo desta forma intensificado o nível sonoro do emissor devido a ondas refletidas por tais superfícies, originando um aumento do valor de RASTI.

São agora apresentadas comparações entre os valores de RASTI, TR e volume da sala. Nestas comparações são utilizadas linhas de tendência e respetivas equações. A linha de tendência apresentada é aquela que resulta da função cujo valor da variância (R^2) é maior. A análise é realizada para funções lineares ($y=ax+b$), funções exponenciais ($y=ae^{bx}$), funções polinomiais de 2º grau ($y=ax^2+bx+c$), funções logarítmicas ($y=a \ln(x)+b$) e funções de potência ($y=ax^b$).

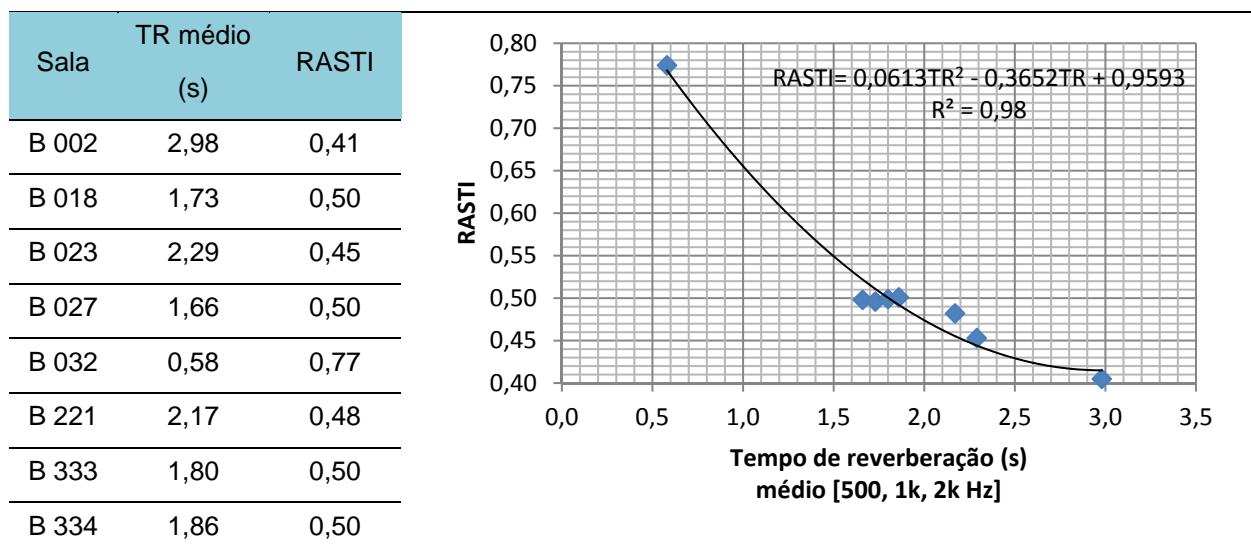
O Quadro 6.19 apresenta a relação existente entre o tempo de reverberação médio (500, 1k e 2k Hz) das diversas salas e o seu valor de RASTI médio obtido. Como pode verificar-se com o aumento dos tempos de reverberação das salas a inteligibilidade da palavra diminui.

O Quadro 6.20 mostra a relação existente entre o tempo de reverberação médio (500, 1k e 2k Hz) e os respetivos volumes do compartimento. É possível confirmar-se que quanto maior o volume da sala maior é o seu tempo de reverberação. Note-se que esta comparação apenas é possível devido aos acabamentos das várias salas ser idêntico e o valor da sala B 032 não ser considerado, visto tratar-se de acabamentos muito melhores acusticamente que as restantes salas.

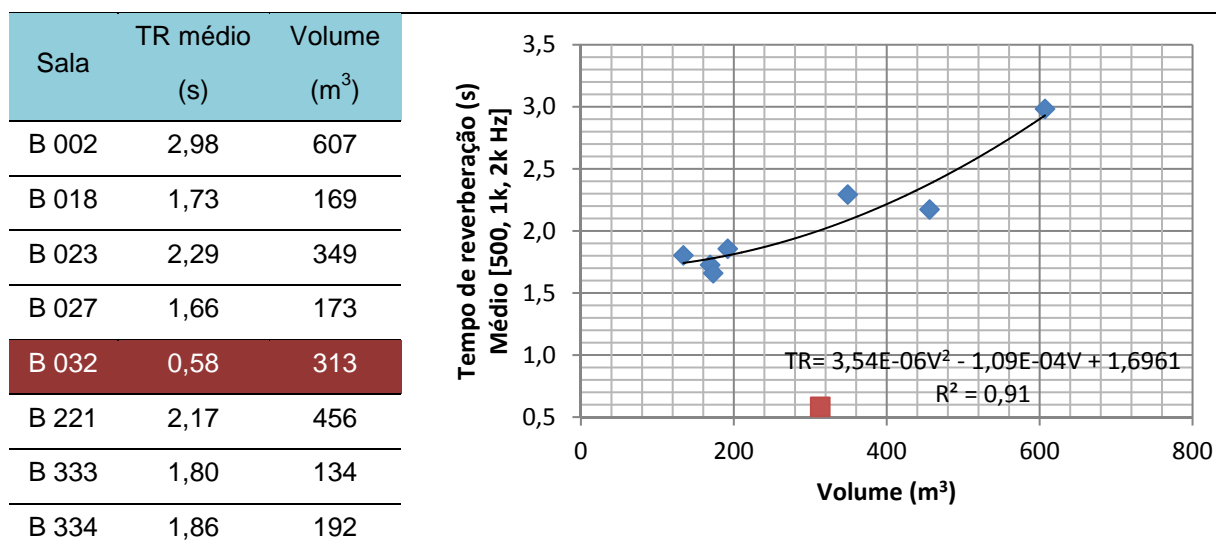
O Quadro 6.21 demonstra a relação existente entre o RASTI e o volume do respetivo compartimento. Para a definição da linha de tendência não foi considerada a sala B 032, isto por ser uma sala já tratada, apresentando uma elevada melhoria dos valores de RASTI, assim é possível concluir-se que quanto maior o volume da sala menor será a sua inteligibilidade, no entanto a variação do RASTI é

muito reduzida em função do volume, sendo então perceptível que o valor de RASTI estará diretamente ligado com a absorção sonora existente.

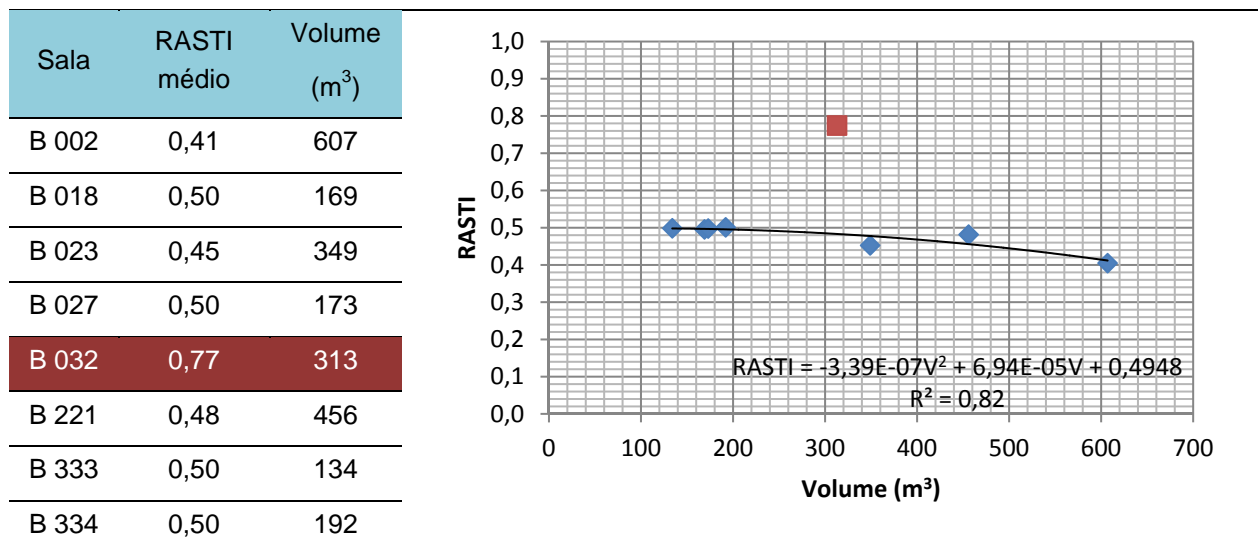
Quadro 6.19 – Relação entre TR médio obtido para frequências de 500, 1000 e 2000 Hz e os valores de RASTI.



Quadro 6.20 – Relação entre TR médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz e os volumes das salas.



Quadro 6.21 – Relação entre RASTI médio e os respetivos volumes.



Quadro 6.22 – Resumo das equações encontradas.

Relação	Equação	Variância
RASTI/TR	$RASTI = 0,0613TR^2 - 0,3652TR + 0,9593$	$R^2 = 0,98$
TR/V	$TR = 3,54E-06V^2 - 1,09E-04V + 1,6961$	$R^2 = 0,91$
RASTI/V	$RASTI = -3,39E-07V^2 + 6,94E-05V + 0,4948$	$R^2 = 0,82$













O Quadro 6.23 compara a variação entre uma sala acusticamente tratada (sala B 032) e uma sala de características e volume idêntico. É possível verificar-se que existe uma melhoria bastante acentuada no tempo de reverberação, trata-se de uma melhoria de 1,7 s, o que origina também um grande aumento da inteligibilidade da palavra de 0,32. Assim é possível perceber-se que uma sala tratada convenientemente origina numa grande melhoria acústica.

Quadro 6.23 – Comparação entre sala acusticamente tratada (B 032) e sala sem tratamento (B 023) com idêntico volume.

Parâmetro	B 032 V=313 m ³	B 023 V=349 m ³	Δ TR Δ RASTI
TR médio (500, 1k, 2k Hz) (s)	0,6	2,3	- 1,7
RASTI	0,77	0,45	+ 0,32

Por forma a avaliar o tempo de reverberação existente com as várias disposições regulamentares já apresentadas no capítulo 5 o Quadro 6.24 apresenta os resultados para cada país, conforme a sua legislação.

Quadro 6.24 – Avaliação do TR das salas da FEUP com diversas legislações.

Sala	B 002	B 018	B 023	B 027	B 032	B 221	B 333	B 334
Volume (m ³)	607	169	349	173	313	456	134	192
Altura média (m)	4,19	2,99	3,90	2,93	3,89	2,71	2,73	2,73
TR médio (s) (500 a 2k Hz)	3,0	1,7	2,3	1,7	0,6	2,2	1,8	1,9
TR médio (s) (250 a 2k Hz)	3,1	1,8	2,4	1,7	0,7	2,3	1,8	1,9
TR médio (s) (125 a 2k Hz)	3,0	1,8	2,4	1,7	0,7	2,4	1,9	1,9
TR médio (s) (250 a 4k Hz)	2,9	1,7	2,3	1,6	0,6	2,2	1,8	1,8
País	-----							
Alemanha [37] (250 a 2k Hz)	≤ 0,72 	≤ 0,54 	≤ 0,64 	≤ 0,55 	≤ 0,63 	≤ 0,68 	≤ 0,51 	≤ 0,56 
Espanha [45] (500 a 2k Hz)	≤ 0,5 	≤ 0,5 	≤ 0,5 	≤ 0,5 	≤ 0,5 	≤ 0,5 	≤ 0,5 	≤ 0,5 
EUA [34] (500 a 2k Hz)	Sem limite	≤ 0,6 	≤ 0,7 	≤ 0,6 	≤ 0,7 	≤ 0,7 	≤ 0,6 	≤ 0,6 
França [46] (500 a 2k Hz)	≥ 0,6 ≤ 1,2 	≥ 0,4 ≤ 0,8 	≥ 0,6 ≤ 1,2 	≥ 0,4 ≤ 0,8 	≥ 0,6 ≤ 1,2 	≥ 0,6 ≤ 1,2 	≥ 0,4 ≤ 0,8 	≥ 0,4 ≤ 0,8 
Noruega [49] (125 a 2k Hz)	≤ 0,84 	≤ 0,60 	≤ 0,78 	≤ 0,59 	≤ 0,78 	≤ 0,54 	≤ 0,55 	≤ 0,55 
Portugal [44] (500 a 2k Hz)	≤ 1,27 	≤ 0,83 	≤ 1,06 	≤ 0,84 	≤ 1,02 	≤ 1,15 	≤ 0,77 	≤ 0,87 
Reino Unido [48] (500 a 2k Hz)	≤ 0,8 	≤ 0,8 	≤ 0,8 	≤ 0,8 	≤ 0,8 	≤ 0,8 	≤ 0,8 	≤ 0,8 
Suécia [47] (250 a 4k Hz)	≤ 0,6 	≤ 0,6 	≤ 0,6 	≤ 0,6 	≤ 0,6 	≤ 0,6 	≤ 0,6 	≤ 0,6 
Suíça [38] (250 a 2k Hz)	≤ 0,72 	≤ 0,54 	≤ 0,64 	≤ 0,55 	≤ 0,63 	≤ 0,68 	≤ 0,51 	≤ 0,56 
Nº de incumprimentos	8	9	9	9	3	9	9	9
 Cumpe o critério  Não cumpre o critério								

Como pode verificar-se as salas avaliadas não cumprem os requisitos dos países em análise, excetuando-se a sala B 032 que apresenta resultados possíveis em quase todos os países. Tendo em consideração que o país onde as salas estão construídas é Portugal e este é dos países em análise com limites possíveis mais elevados, facilmente se compreende que só a sala B 032 apresenta valores admissíveis, estando todas as outras salas muito aquém dos valores admissíveis.

Em relação aos valores ideais apresentados de 0,7 s, é fácil perceber-se que nenhuma das salas verificaria tal critério, excetuando apenas a sala B 032.

É de lamentar que uma escola construída tão recentemente tenha descurado totalmente a qualidade básica das suas salas em termos acústicos. Mesmo a sala B 032, é frustrante notar que é a única sala onde os alunos não têm aulas, sendo a sala exclusivamente utilizada para eventos.

7

SUGESTÃO DE MELHORIA

7.1. METODOLOGIA DA PROPOSTA DE MELHORIA

Devido às salas de aula da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto apresentarem tempos de reverberação elevados (e RASTI reduzidos) e por forma a melhorar a sua qualidade, são apresentadas neste capítulo soluções de possível melhoria das diversas salas.

Para um limite ideal do tempo de reverberação médio de 0,7 s (nas frequências de 500 a 2k Hz) determina-se a área de material acústico necessário para que o seu tempo de reverberação diminuía para tal valor. Dado não existir informação sobre os coeficientes de absorção sonora dos diversos materiais existentes na sala, foi adotado um método simplificado para assim determinar a área necessária a aplicar de um novo material.

Partindo da equação de Sabine (equação 2.13), determina-se o valor do coeficiente de absorção médio ($\alpha_{\text{médio}}$) para cada banda de frequência. Veja-se o seguinte exemplo realizado para a sala B 334 na banda de frequências dos 2000 Hz:

$$\begin{aligned}
 \text{Volume } (V) &= 192 \text{ m}^3 \\
 S_{\text{6faces}} &= 235 \text{ m}^2 \\
 TR_{\text{médio 2k Hz}} &= 1,73 \text{ s} \\
 \text{Temperatura } (T) &= 20 \text{ }^\circ\text{C} \\
 \text{Humidade Relativa } (HR) &= 64\% \\
 TR &= \frac{\frac{24 \times \ln(10)}{20,045 \times \sqrt{273,15 \times T}} \times V}{S_{\text{6faces}} \times \alpha_{\text{médio}} + m \times V} \Leftrightarrow 1,73 = \frac{\frac{24 \times \ln(10)}{20,045 \times \sqrt{273,15 \times 20}} \times 192}{235 \times \alpha_{\text{médio}} + 0,004 \times 192} \\
 &\Leftrightarrow \alpha_{\text{médio}} = 0,073
 \end{aligned}$$

O coeficiente m é o coeficiente de absorção sonora do ar e pode ser obtido pelos valores do Quadro 2.3, dependendo da humidade relativa do ar e da frequência em análise. O valor de S_{6faces} corresponde à área total das superfícies do compartimento, ou seja, área do piso, teto, paredes laterais, parede de fundo e parede da frente da sala.

Após determinado o coeficiente de absorção médio da sala (admitindo simplificadamente que a absorção do mobiliário está proporcionalmente incluída no $\alpha_{\text{médio}}$), determina-se a área de material absorvente necessária para satisfazer a condição desejada para cada banda de frequência. Para o efeito utiliza-se a seguinte equação:

$$S_2 = \frac{\frac{24 \times \ln(10)}{20,045 \times \sqrt{273,15 \times T}} \times V}{TR_{desejado} - m \times V - S_{6faces} \times \alpha_{médio}} \quad (7.1)$$

O valor de S_{6faces} é a área total das superfícies da sala e S_2 é a área correspondente à superfície com o novo material absorvente; o valor de $TR_{desejado}$ corresponde ao valor do TR médio nas frequências de 500 a 2k Hz que se pretende obter.

Após determinado a área de material a aplicar nas várias frequências, calcula-se a média aritmética das áreas obtidas nas frequências de 500 a 2k Hz, obtendo-se desta forma a quantidade de material absorvente necessária para que origine o tempo de reverberação médio desejado.

Os locais onde o novo material pode ser aplicado são o teto (excluindo a zona por cima do professor para que não seja absorvida a sua voz rapidamente) e a parte superior das paredes. Devido à existência de equipamentos de iluminação, de ventilação e a zona do por cima do professor, admite-se que em apenas 80% da área de teto pode ser aplicado o novo material absorvente. Apenas deve ser utilizado material absorvente nas paredes quando a área de material aplicado no teto não seja suficiente e sempre o mais alto possível para evitar que estes sejam danificados.

7.2. MATERIAIS PROPOSTOS

Devido a tentar manter-se uma solução estética idêntica à existente, os materiais escolhidos apresentam um acabamento visualmente próximo ao existente, mantendo-se assim a aparência das salas sem muita diferença. São eles:

- *Sonaspray*[®]
- *BASWAphon*[®]
- *Sonacoustic*[®]
- *SonaKrete*[®]

O *Sonaspray*[®] é um produto celuloso projetado possível de ser utilizado sobre todo o tipo de superfícies, tais como metal, betão, gesso, gesso cartonado, vidro, etc. Trata-se de um produto 100% natural com propriedades térmicas e acústicas podendo apresentar três graus de acabamentos [52]:

- *Sonaspray*[®] *K-13 standard* é a solução mais texturada de todas, quando aplicado apresenta um aspeto idêntico ao de uma alcatifa;
- *Sonaspray*[®] *K-13 special* é uma solução que apresenta uma textura intermédia, em termos de características é idêntico ao anterior, apenas apresenta um acabamento mais cuidado;
- *Sonaspray*[®] *fc* apresenta uma composição bastante pequena sendo capaz de obter-se o melhor acabamento possível de *Sonaspray*[®]. Quando aplicado o seu acabamento pode ser comparado com as correntes tintas de areia. Este é sem dúvida o material mais indicado a utilizar por forma a manter-se um acabamento mais próximo do existente.

Em relação ao *Sonaspray*[®] propõe-se utilizar as seguintes soluções apresentadas no Quadro 7.1. Os coeficientes de absorção sonora dos materiais *Sonaspray*[®] propostos são indicados no Quadro 7.1.

O *BASWAphon*[®] é um material que é composto por placas de lã mineral que são coladas nas superfícies, sendo posteriormente aplicadas várias camadas de uma massa mineral por forma a criar-se uma superfície contínua. Este material apresenta uma boa absorção sonora, sendo também bastante resistente ao fogo. O seu acabamento pode ser subdividido em três graus [53]:

- *BASWAphon*[®] *Base*, a massa apresenta uma granulometria de 0,7 mm originando um bom acabamento;
- *BASWAphon*[®] *Fine*, a massa apresenta uma granulometria de 0,5 mm originando um acabamento melhorado em relação ao anterior, mas com uma ligeira perda na capacidade absorvente;
- *BASWAphon*[®] *classic*, a massa apresenta uma granulometria de 0,3 mm originando um excelente acabamento, mas com uma capacidade absorvente sonora reduzida quando comparada com *BASWAphon*[®] *Base*.

Devido ao aspeto ser praticamente idêntico entre os vários graus de acabamento, a análise é realizada apenas com o *BASWAphon*[®] *Base* devido a este apresentar as melhores características acústicas. Desta forma o Quadro 7.1 apresenta os coeficientes de absorção sonora do material.

O *Sonacoustic*[®] é um material idêntico ao anterior com uma composição de lã mineral que é colada à superfície onde depois são projetadas duas camadas de um material de acabamento que será regularizado. Trata-se de solução com um aspeto bastante nobre, podendo ser aplicado sobre qualquer tipo de material tradicional. *Sonacoustic*[®] é um material que apresenta boa absorção acústica, excelente resistência ao fogo, leve, de instalação rápida e de fácil reparação [54].

Este material é produzido em três espessuras diferente. Para a análise assume-se a solução de 25 mm que apresenta os coeficientes de absorção sonora presentes no Quadro 7.1.

O *SonaKrete*[®] é um material projetado sobre qualquer tipo de material, revestindo assim toda a superfície continuamente. Após projetado é acabado manualmente por equipas especializadas. Trata-se de um material com fibras muito pequenas, originando superfícies bastante lisas, apresenta uma absorção acústica razoável, boa resistência ao fogo, rapidez de aplicação, fácil manutenção e é um produto ecológico, pois é composto 90% por papel reciclado [55].

Admite-se apenas na análise da proposta o uso de *SonaKrete*[®] de 19 mm, pois é a melhor solução desta gama. Os coeficientes de absorção sonora deste material são apresentados no Quadro 7.1.

O Quadro 7.1 apresenta os dados dos diversos materiais propostos e os preços por metro quadrado de cada um deles. O preço é apenas indicativo, sendo fornecido pela cortesia da empresa *S.T.I.E.R. Lda* para obras situadas no Porto com uma dimensão superior a 1000 m², não sendo ainda contabilizado o custo de mão-de-obra.

Quadro 7.1 – Resumo dos materiais propostos e respetivos preços [56].

Material	Espessura (mm)	Preço ** (€/m ²)	Coeficiente de absorção sonora					
			Frequências (Hz)					
			125	250	500	1k	2k	4k
<i>Sonaspray® K-13 Standard</i>	25	25,00	0,15	0,54	0,91	1,02*	0,97	0,91
<i>Sonaspray® fc</i>	19	42,50	0,10	0,34	0,85	0,98	1,04*	1,04*
<i>BASWAphon® Base</i>	30	122,00	0,10	0,32	0,83	0,89	0,73	0,65
<i>Sonacoustic®</i>	25	88,00	0,14	0,47	0,88	0,97	0,89	0,81
<i>SonaKrete®</i>	19	64,00	0,25	0,48	0,81	0,85	0,85	0,94

* Nos cálculos posteriores foi usado 1,00

** Não inclui custo de mão-de-obra nem IVA

7.3. ANÁLISE DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

7.3.1. SALA B 002

Tendo em consideração o método apresentado no subcapítulo 7.1, as áreas necessárias de material a aplicar na sala B 002 são as apresentadas no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 002 para produzir um TR de 0,7 s.

Dados necessários para o cálculo	Área de teto = 152 m ² (x0,80 = 121,6 m ²)							
	S _{6faces} = 532,6 m ²							
	Volume = 607 m ³							
	Temperatura = 20 °C							
	Humidade relativa = 62%							
Área de material necessário para produzir um tempo de reverberação de 0,7 s (m ²)								
Frequências (Hz)	TR (s)	m (m ⁻¹)	α _{médio}	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
500	3,38	0,000	0,054	129	139	143	134	147
1000	2,85	0,003	0,061	112	115	127	116	134
2000	2,72	0,004	0,063	114	111	155	125	132

Para satisfazer a solução de possuir um tempo de reverberação médio de 0,7 s nas bandas de frequência de 500 a 2k Hz seria apenas necessário aplicar uma área de material correspondente à média das áreas obtidas para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (Quadro 7.3). Como as áreas necessárias compreendem-se entre os 119 e os 137 m^2 deverá ser aplicado apenas $121,6 \text{ m}^2$ no teto (valor máximo) e a restante área deve ser aplicada numa faixa superior da parede de fundo caso necessário.

Quadro 7.3 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 002 e respetivo custo aproximado.

	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
Área necessária (m^2)	119	121	142	125	137
Custo total da correção (€) *	2.970	5.160	17.290	11.010	8.790

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

7.3.2. SALA B 018

Tendo em consideração o método apresentado no subcapítulo 7.1, as áreas necessárias de material a aplicar na sala B 018 são as apresentadas no Quadro 7.4.

Quadro 7.4 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 018 para produzir um TR de 0,7 s.

Dados necessários para o cálculo	Área de teto = $56,5 \text{ m}^2$ ($\times 0,80 = 45,2 \text{ m}^2$)							
	$S_{6\text{faces}} = 212,7 \text{ m}^2$							
	Volume = 169 m^3							
	Temperatura = $19 \text{ }^\circ\text{C}$							
	Humidade relativa = 67%							
				Área de material necessário para produzir um tempo de reverberação de 0,7 s (m^2)				
Frequências (Hz)	TR (s)	m (m^{-1})	$\alpha_{\text{médio}}$	Sonasy® K-13 Standard	Sonasy® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
500	1,78	0,000	0,072	28	30	31	29	32
1000	1,73	0,003	0,072	25	26	28	26	30
2000	1,67	0,004	0,074	25	24	35	28	29

Para satisfazer a solução de possuir um tempo de reverberação médio de 0,7 s nas bandas de frequência de 500 a 2k Hz seria apenas necessário aplicar uma área de material correspondente à média das áreas obtidas para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (Quadro 7.5). Como as áreas necessárias compreendem-se entre os 26 e os 31 m^2 deverá ser aplicado todo o material no teto, pois o valor máximo é de 45,2 m^2 .

Quadro 7.5 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 018 e respetivo custo aproximado.

	Sonasy® K-13 Standard	Sonasy® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
Área necessária (m^2)	26	27	31	28	30
Custo total da correção (€) *	660	1.140	3.830	2.430	1.950

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

7.3.3. SALA B 023

Tendo em consideração o método apresentado no subcapítulo 7.1, as áreas necessárias de material a aplicar na sala B 023 são as apresentadas no Quadro 7.6.

Quadro 7.6 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 023 para produzir um TR de 0,7 s.

Dados necessários para o cálculo	Área de teto = 89,5 m ² (x0,80 = 71,6 m ²)							
	S _{6faces} = 357,3 m ²							
	Volume = 349 m ³							
	Temperatura = 19 °C							
	Humidade relativa = 66%							
Área de material necessário para produzir um tempo de reverberação de 0,7 s (m ²)								
Frequências (Hz)	TR (s)	m (m ⁻¹)	α _{médio}	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
500	2,41	0,000	0,065	68	73	75	70	77
1000	2,26	0,003	0,067	60	61	68	62	71
2000	2,21	0,004	0,067	61	59	83	67	70

Para satisfazer a solução de possuir um tempo de reverberação médio de 0,7 s nas bandas de frequência de 500 a 2k Hz seria apenas necessário aplicar uma área de material correspondente à média das áreas obtidas para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (Quadro 7.7). Como as áreas necessárias compreendem-se entre os 63 e os 75 m^2 deverá ser aplicado 71,6 m^2 no teto (valor máximo) e a restante área deve ser aplicada numa faixa superior da parede de fundo.

Quadro 7.7 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 023 e respetivo custo aproximado.

	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
Área necessária (m^2)	63	64	75	66	73
Custo total da correção (€) *	1.570	2.730	9.160	5.830	4.650

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

7.3.4. SALA B 027

Tendo em consideração o método apresentado no subcapítulo 7.1, as áreas necessárias de material a aplicar na sala B 027 são as apresentadas no Quadro 7.8.

Quadro 7.8 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 027 para produzir um TR de 0,7 s.

Dados necessários para o cálculo	Área de teto = $59,2 \text{ m}^2$ ($\times 0,80 = 47,4 \text{ m}^2$)							
	$S_{6\text{faces}} = 218,2 \text{ m}^2$							
	Volume = 173 m^3							
	Temperatura = $19 \text{ }^\circ\text{C}$							
	Humidade relativa = 56%							
					Área de material necessário para produzir um tempo de reverberação de 0,7 s (m^2)			
Frequências (Hz)	TR (s)	m (m^{-1})	$\alpha_{\text{médio}}$	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
500	1,69	0,000	0,076	28	30	31	29	32
1000	1,65	0,003	0,075	25	25	28	26	30
2000	1,64	0,005	0,074	26	25	35	28	30

Para satisfazer a solução de possuir um tempo de reverberação médio de 0,7 s nas bandas de frequência de 500 a 2k Hz seria apenas necessário aplicar uma área de material correspondente à média das áreas obtidas para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (Quadro 7.9). Como as áreas necessárias compreendem-se entre os 26 e os 31 m^2 deverá ser aplicado todo o material no teto, pois o valor máximo é de 47,4 m^2 .

Quadro 7.9 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 027 e respetivo custo aproximado.

	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
Área necessária (m^2)	26	27	31	28	30
Custo total da correção (€) *	660	1.140	3.830	2.430	1.950

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

7.3.5. SALA B 221

Tendo em consideração o método apresentado no subcapítulo 7.1, as áreas necessárias de material a aplicar na sala B 221 são as apresentadas no Quadro 7.10.

Quadro 7.10 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 221 para produzir um TR de 0,7 s.

Dados necessários para o cálculo	Área de teto = 168 m ² (x0,80 = 134,4 m ²)							
	S _{6faces} = 506,2 m ²							
	Volume = 456 m ³							
	Temperatura = 20 °C							
	Humidade relativa = 64%							
Área de material necessário para produzir um tempo de reverberação de 0,7 s (m ²)								
Frequências (Hz)	TR (s)	m (m ⁻¹)	α _{médio}	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
500	2,47	0,000	0,059	88	95	97	91	100
1000	2,04	0,003	0,069	74	76	84	76	88
2000	2,01	0,004	0,069	76	73	103	83	87

Para satisfazer a solução de possuir um tempo de reverberação médio de 0,7 s nas bandas de frequência de 500 a 2k Hz seria apenas necessário aplicar uma área de material correspondente à média das áreas obtidas para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (Quadro 7.11). Como as áreas necessárias compreendem-se entre os 79 e os 95 m^2 deverá ser aplicado todo o material no teto, pois o valor máximo é de 134,4 m^2 .

Quadro 7.11 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 221 e respetivo custo aproximado.

	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
Área necessária (m^2)	79	81	95	84	92
Custo total da correção (€) *	1.990	3.460	11.570	7.370	5.880

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

7.3.6. SALA B 333

Tendo em consideração o método apresentado no subcapítulo 7.1, as áreas necessárias de material a aplicar na sala B 333 são as apresentadas no Quadro 7.12.

Quadro 7.12 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 333 para produzir um TR de 0,7 s.

Dados necessários para o cálculo	Área de teto = $49,2 \text{ m}^2$ ($\times 0,80 = 39,4 \text{ m}^2$)							
	$S_{6\text{faces}} = 175 \text{ m}^2$							
	Volume = 134 m^3							
	Temperatura = $20 \text{ }^\circ\text{C}$							
	Humidade relativa = 63%							
					Área de material necessário para produzir um tempo de reverberação de 0,7 s (m^2)			
Frequências (Hz)	TR (s)	m (m^{-1})	$\alpha_{\text{médio}}$	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
500	1,92	0,000	0,064	23	25	27	24	26
1000	1,74	0,003	0,069	20	20	23	21	24
2000	1,75	0,004	0,068	21	20	28	23	24

Para satisfazer a solução de possuir um tempo de reverberação médio de 0,7 s nas bandas de frequência de 500 a 2k Hz seria apenas necessário aplicar uma área de material correspondente à média das áreas obtidas para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (Quadro 7.13). Como as áreas necessárias compreendem-se entre os 21 e os 25 m^2 deverá ser aplicado todo o material no teto, pois o valor máximo é de $39,4 \text{ m}^2$.

Quadro 7.13 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 333 e respetivo custo aproximado.

	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
Área necessária (m^2)	21	22	25	22	25
Custo total da correção (€) *	530	930	3.100	1.970	1.580

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

7.3.7. SALA B 334

Tendo em consideração o método apresentado no subcapítulo 7.1, as áreas necessárias de material a aplicar na sala B 334 são as apresentadas no Quadro 7.14.

Quadro 7.14 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 334 para produzir um TR de 0,7 s.

Dados necessários para o cálculo	Área de teto = 70,5 m ² (x0,80 = 56,4 m ²)							
	S _{6faces} = 235,3 m ²							
	Volume = 192 m ³							
	Temperatura = 20 °C							
	Humidade relativa = 64%							
Área de material necessário para produzir um tempo de reverberação de 0,7 s (m ²)								
Frequências (Hz)	TR (s)	m (m ⁻¹)	α _{médio}	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
500	2,01	0,000	0,065	34	37	38	35	39
1000	1,83	0,003	0,070	29	30	33	30	35
2000	1,73	0,004	0,073	29	28	40	32	34

Para satisfazer a solução de possuir um tempo de reverberação médio de 0,7 s nas bandas de frequência de 500 a 2k Hz seria apenas necessário aplicar uma área de material correspondente à média das áreas obtidas para as frequências de 500, 1k e 2k Hz (Quadro 7.15). Como as áreas necessárias compreendem-se entre os 31 e os 37 m^2 deverá ser aplicado todo o material no teto, pois o valor máximo é de 56,4 m^2 .

Quadro 7.15 – Áreas de material necessário aplicar na sala B 334 e respetivo custo aproximado.

	Sonaspay® K-13 Standard	Sonaspay® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
Área necessária (m^2)	31	32	37	33	36
Custo total da correção (€) *	780	1.350	4.520	2.880	2.300

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

7.3.8. RESUMO DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

Como o cálculo realizado origina aproximadamente o mesmo tempo de reverberação médio para as diversas soluções, ou seja um tempo de reverberação de cerca de 0,7 s, o material a utilizar poderá ser escolhido em função do preço e/ou do aspeto final.

Todo o bloco B da faculdade apresenta uma totalidade de 112 salas podendo subdividir-se nas oito salas estudadas. Desta forma torna-se possível estimar a quantidade de material necessário a utilizar para a correta correção acústica das salas de todo o bloco B da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, de forma a possuírem um tempo de reverberação adequado (Quadro 7.16).

Quadro 7.16 – Resumo de material necessário para corrigir acusticamente todo o bloco B e respetivo custo aproximado.

Sala tipo	Quantidade	Sonaspray® K-13 Standard	Sonaspray® fc	BASWAphon® Base	Sonacoustic®	SonaKrete®
B 002	3	119	121	142	125	137
B 018	8	26	27	31	28	30
B 023	13	63	64	75	66	73
B 027	10	26	27	31	28	30
B 032	1	-----Já tratada, TR inferior a 0,7 s-----				
B 221	15	79	81	95	84	92
B 333	42	21	22	25	22	25
B 334	20	31	32	37	33	36
Total (m ²)		4331	4460	5174	4581	5050
Custo Total (10 ³ €) aproximado *		109	190	632	404	324

* Não inclui custos de mão-de-obra nem IVA

De todos os materiais apresentados é possível concluir-se que o mais económico é o *Sonaspray® K-13 Standard* de 25 mm, pois é necessária uma menor quantidade de material, isto deve-se ao facto de este material apresentar maiores coeficientes de absorção sonora nas frequências de 500 aos 2000 Hz. No entanto é sem dúvida o material esteticamente menos apelativo a utilizar devido à sua textura mais rugosa, daí o seu preço mais reduzido. Os materiais apresentados foram já aplicados em inúmeras escolas, bibliotecas e igrejas por todo o país.

Com um mínimo de 109 mil euros (ou cerca de 970 euros por sala), sem considerar custos de mão-de-obra nem de IVA, pode-se transformar a FEUP, de uma boa escola para a escola acusticamente ideal, isto para que não sejam só as visitas a usufruir de boas salas (B 032).

8

REGRAS DE PROJETO

8.1. GENERALIDADES

Todos os edifícios sejam eles destinados à habitação, à educação, à saúde ou ao comércio antes da sua construção iniciam-se pela execução de projetos que serão a base da sua realização. Quando se fala num bom projeto este engloba projetos de arquitetura, de estruturas, de térmica, de águas e esgotos, de instalações elétricas, de gás, de AVAC, mas o projeto de acústica é por vezes esquecido.

No passado recente o projeto acústico raramente era realizado, talvez por se tratar de alterações na obra invisíveis ao olhar, impossíveis de tocar, por se tratar apenas de alterações sentidas pelos utilizadores futuros do edifício e não por quem os constrói. Mas neste trabalho foi já demonstrada a importância de boas condições acústicas em escolas, embora escritórios, igrejas, restaurantes, salas de conferências, salas de cinema, em resumo todos os espaços fechados para um dado fim, necessitam de determinadas condições acústicas que potenciem o bem-estar dos utilizadores desse mesmo espaço. Assim o projeto acústico deve ser realizado.

Todos os locais fechados devem apresentar um tempo de reverberação adequado ao fim a que se destinam, assim na fase de projeto deverão ser tomadas medidas para garantir um adequado tempo de reverberação.

Mas como assegurar um bom tempo de reverberação numa sala de aula? Esta é certamente a questão mais importante.

8.2. MÉTODO A UTILIZAR

O caso de estudo já apresentado consiste na realização de um melhoramento de salas já construídas o que facilita de alguma forma a sua intervenção, pois já é possível estimar os coeficientes de absorção sonora dos vários materiais utilizados. Mas o objetivo é apresentar uma solução para quando não existe o edifício. Torna-se assim necessário conhecer à partida os coeficientes de absorção sonora dos diversos materiais a serem utilizados, mas não são valores fáceis de se obter, pois quase todos ou mesmo todos os materiais vulgarmente utilizados na construção não apresentam um único valor em relação ao seu comportamento acústico. No entanto existem valores de referência que podem ser utilizados (Quadro 8.1).

Quadro 8.1 – Valores de referência de coeficientes de absorção sonora de alguns materiais [adaptado de [57]].

Materiais	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Materiais de pavimento						
Tapete	0,01	0,02	0,06	0,15	0,25	0,45
Betão (sem pintura, acabamento áspero)	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
Betão (liso ou pintado)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Mármore ou azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Telha de vinil ou linóleo em betão	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Soalho (<i>parquet</i>) de madeira em betão	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Soalho sobre vigas de madeira com caixa de ar	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Materiais de assento						
Bancos (de madeira, vazios)	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
Bancos (de madeira, 2/3 ocupados)	0,37	0,40	0,47	0,53	0,56	0,53
Bancadas (de madeira, totalmente ocupadas)	0,50	0,56	0,66	0,76	0,80	0,76
Bancos (assentos almofadados e costas, vazios)	0,32	0,40	0,42	0,44	0,43	0,48
Bancos (assentos almofadados e costas, 2/3 ocupados)	0,44	0,56	0,65	0,72	0,72	0,67
Bancos (assentos almofadados e costas, totalmente ocupado)	0,50	0,64	0,76	0,86	0,86	0,76
Assentos do teatro (de madeira, vazios)	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08
Cadeiras de teatro (de madeira, 2/3 ocupadas)	0,34	0,21	0,28	0,53	0,56	0,53
Assentos do teatro (de madeira, totalmente ocupados)	0,50	0,30	0,40	0,76	0,80	0,76
Assentos (tecido estofado, vazios)	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Assentos (tecido estofado, totalmente ocupados)	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
Materiais de parede refletores						
Tijolo (natural)	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Tijolo (pintado)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Bloco de betão (natural)	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
Bloco de betão (pintado)	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Betão (projetado, acabamento áspero, sem pintura)	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
Portas (painéis de madeira maciça)	0,10	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04

Materiais	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Vidro espesso	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Placa de gesso (12 mm)	0,29	0,10	0,06	0,05	0,04	0,04
Argamassa (gesso ou cal, em alvenaria)	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Argamassa (gesso ou cal, em ripas de madeira)	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,04
Contraplacado (3 mm sobre 32 mm de caixa de ar)	0,15	0,25	0,12	0,08	0,08	0,08
Contraplacado (3 mm sobre 57 mm de caixa de ar)	0,28	0,20	0,10	0,10	0,08	0,08
Contraplacado (5 mm sobre 50 mm de caixa de ar)	0,38	0,24	0,17	0,10	0,08	0,05
Contraplacado (5 mm de painel, com 25 mm de lã de vidro em 50 mm de caixa de ar)	0,42	0,36	0,19	0,10	0,08	0,05
Materiais de parede absorvente						
Cortina (340 g/m ² , encostado à parede)	0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,35
Cortina (476 g/m ² , encostado à parede)	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Cortina (612 g/m ² , encostado à parede)	0,05	0,12	0,35	0,48	0,38	0,36
Cortina (476 g/m ² , franzido em 50%)	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Cortina (612 g/m ² , franzido em 50%)	0,14	0,35	0,53	0,75	0,70	0,60
Placa de fibra de vidro (25 mm)	0,06	0,20	0,65	0,90	0,95	0,98
Placa de fibra de vidro (50 mm)	0,18	0,76	0,99	0,99	0,99	0,99
Placa de fibra de vidro (75 mm)	0,53	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Placa de fibra de vidro (100 mm)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97
Tijolo padrão aberto sobre 75 mm de fibra de vidro	0,40	0,65	0,85	0,75	0,65	0,60
Materiais de teto						
Placa de gesso (12 mm em grade de teto suspenso)	0,15	0,11	0,04	0,04	0,07	0,08
Gesso (gesso ou cal, na alvenaria)	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Gesso (acabamento rugoso de gesso ou cal ou ripas de madeira)	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,04
Fibra de celulose pulverizada (16 mm em suporte sólido)	0,05	0,16	0,44	0,79	0,90	0,91
Fibra de celulose pulverizada (25 mm em suporte sólido)	0,08	0,29	0,75	0,98	0,93	0,76
Fibra de celulose pulverizada (25 mm em ripa de madeira)	0,47	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00

Materiais	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fibra de celulose pulverizada (32 mm em suporte sólido)	0,10	0,30	0,73	0,92	0,98	0,98
Fibra de celulose pulverizada (75 mm em suporte sólido)	0,70	0,95	1,00	0,85	0,85	0,90
Vários materiais de superfície						
Pessoas/adultos (por 1/10 pessoa)	0,25	0,35	0,42	0,46	0,50	0,50
Pessoas/estatura média (por 1/10 pessoa)	0,22	0,30	0,38	0,42	0,45	0,45
Pessoas/estatura baixa (por 1/10 pessoa)	0,18	0,23	0,28	0,32	0,35	0,35
Grelhas de ventilação	0,30	0,40	0,50	0,50	0,50	0,40
Espelho de água ou gelo	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03

Utilizando os valores de referência apresentados é possível estimar-se a quantidade necessária a aplicar de um dado material absorvente numa dada sala para satisfazer o tempo de reverberação pretendido, recorrendo para tal à equação 8.1, baseada na fórmula de Sabine.

$$TR_{desejado} = \frac{\frac{0,16 \times V}{A_{500}} + \frac{0,16 \times V}{A_{1000}} + \frac{0,16 \times V}{A_{2000}}}{3} \quad (8.1)$$

Com:

$$A_{500} = S_{Novo} \times \alpha_{Novo_{500 \text{ Hz}}} + \sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_{i_{500 \text{ Hz}}} + \sum_{j=1}^m A_{localizada_{500 \text{ Hz}_j}}$$

$$A_{1000} = S_{Novo} \times \alpha_{Novo_{1000 \text{ Hz}}} + \sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_{i_{1000 \text{ Hz}}} + \sum_{j=1}^m A_{localizada_{1000 \text{ Hz}_j}} + 0,003 \times V$$

$$A_{2000} = S_{Novo} \times \alpha_{Novo_{2000 \text{ Hz}}} + \sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_{i_{2000 \text{ Hz}}} + \sum_{j=1}^m A_{localizada_{2000 \text{ Hz}_j}} + 0,004 \times V$$

Sendo:

$V \rightarrow$ Volume da sala (m^3);

$TR_{desejado} \rightarrow$ Tempo de reverberação desejado, máximo de 0,5 s para o ensino primário e de 0,7 s para o restante ensino;

$A_{500} \rightarrow$ Absorção sonora na banda de frequências dos 500 Hz;

$A_{1000} \rightarrow$ Absorção sonora na banda de frequências dos 1000 Hz;

$A_{2000} \rightarrow$ Absorção sonora na banda de frequências dos 2000 Hz;

S_{Novo} → Área de material absorvente a aplicar. Quando somado com os vários S_i perfaz o total de área de superfícies da sala;

$\alpha_{Novo_{500/1000/2000\text{ Hz}}}$ Coeficiente de absorção sonora do material absorvente a aplicar na respetiva banda de frequência;

S_i → Área de material absorvente das várias superfícies da sala com coeficiente de absorção sonora α_i ;

α_i → Coeficiente de absorção sonora i ;

$A_{localizada_{500/1000/2000\text{ Hz}}}$ → Absorção existente devida ao mobiliário.

O método apresentado deverá ser realizado por iterações, até obter-se o TR desejado, isto deve-se ao facto de ser impossível resolver a equação em ordem a S_{Novo} .

O material deverá ser aplicado no teto, começando-se pelo local mais afastado do docente para evitar a rápida absorção da fala do professor. Caso a área de teto seja inferior à necessária, deverá colocar-se a restante área nas superfícies superiores das paredes a uma altura superior a 2,20 m para evitar estragos do material e absorver ondas que poderiam originar ecos, colocando-se em primeiro lugar na parede de fundo e caso ainda assim não seja suficiente deverá colocar-se o restante nas paredes laterais.

Com este processo, moroso é certo, poderá obter-se salas acusticamente perfeitas mas economicamente baratas, pois a quantidade de material acústico absorvente a aplicar será o mínimo necessário.

8.3. MÉTODO SIMPLIFICADO / REGRAS BÁSICAS

O processo simplificado seguinte apresenta regras básicas que à partida originará tempos de reverberação adequados mas sem qualquer controlo económico, tornando a construção possivelmente mais dispendiosa, embora mais simples de determinação.

Primeiramente deverá evitar-se construir salas de aula com todas as superfícies muito lisas, isto porque tais superfícies apresentam normalmente baixos coeficientes de absorção, ou seja originarão tempos de reverberação elevados.

Segundo o manual de arquitetura desenvolvido pela organização Parque Escolar, E.P.E., criada pelo Decreto – Lei n.º 41/2007, de 21 de fevereiro, indica que a altura mínima de uma sala de aula é de 2,7 m, e a área normal de 100 m² correspondendo à sala de aula de grandes grupos [58].

Desta forma uma sala de aula deverá apresentar um teto absorvente a uma altura compreendida entre os 2,7 e os 3,0 m, sendo o volume da sala de aula máximo de 300 m³, tornando assim o controlo acústico mais fácil de realizar. Com tais dimensões as salas terão uma área de pavimento máxima de 111 m² devendo o comprimento da sala ser menor que a largura, ou seja, a parede onde existe o quadro deverá ser a maior, isto faz com que os alunos estejam mais próximos do docente, diminuindo assim o risco de existência de ecos devidos a reflexões na parede de fundo.

Uma outra característica que poderá evitar o efeito de ecos passa pela existência de uma ligeira inclinação na parede de fundo, desviando assim as ondas sonoras para o piso ou para o teto.

Por forma a determinar simplifadamente a quantidade de material acústico a colocar no teto parte-se dos seguintes pressupostos:

- Apenas existirá o teto acústico com um coeficiente de absorção elevado;
- As restantes superfícies são revestidas com materiais vulgarmente utilizados, com um coeficiente de absorção sonoro de 0,04, ou seja, materiais como as argamassas e pavimentos compostos por soalho de madeira sobre betão.
- A absorção localizada devida à existência de mobília estará em função da área de pavimento, considerando-se para o efeito a existência de uma cadeira e de uma mesa por cada 2 m² de pavimento (com absorção de 0,04 m²), o que corresponde a 25 lugares por cada 50 m² de pavimento (valor normalmente existente em salas normais). O valor da absorção devida à mobília é: $A = 0,04 \times 0,5 \times S$;
- A absorção do ar considerada corresponde a uma humidade relativa de 60% para uma frequência de 1000 Hz, ainda que a sua existência pudesse ser desprezada visto não influenciar significativamente os resultados. Assim, admite-se um valor de $0,003 \times V$.

Assumindo os pressupostos apresentados, a quantidade de material acústico a colocar no teto poderá ser obtido pela equação 8.2.

$$S_{\text{material absorvente}} = \frac{0,16 \times V - (0,003 \times V + S_{\text{total}} \times 0,04 + 0,02 \times S) \times TR_{\text{desejado}}}{(\alpha_{\text{min}} - 0,04) \times TR_{\text{desejado}}} \quad (8,2)$$

Sendo:

$S_{\text{material absorvente}} \rightarrow$ Área de material absorvente a aplicar no teto;

$V \rightarrow$ Volume da sala (m³);

$S_{\text{total}} \rightarrow$ Área total das superfícies da sala;

$S \rightarrow$ Área de pavimento;

$TR_{\text{desejado}} \rightarrow$ Tempo de reverberação desejado, máximo de 0,5 s para o ensino primário e de 0,7 s para o restante ensino;

$\alpha_{\text{min}} \rightarrow$ Menor coeficiente de absorção sonora do material absorvente escolhido para aplicar no teto de entre as bandas de frequências de 500 a 2000 Hz.

Caso o resultado obtido seja superior à área de teto disponível, então pode optar-se por determinar o coeficiente de absorção mínimo a colocar na área total de teto (equação 8.3). Este método parte do mesmo pressuposto que o anterior, implicando que qualquer material com um coeficiente de absorção superior aos indicados irá originar um tempo de reverberação inferior ao utilizado no cálculo.

$$\alpha_{min} = \frac{0,16 \times V - (0,003 \times V + S_{total} \times 0,04 + 0,02 \times S) \times TR_{desejado}}{S_{teto} \times TR} + 0,04 \quad (8.3)$$

Sendo:

α_{min} → Menor coeficiente de absorção sonora do material absorvente a aplicar no teto de entre as bandas de frequências de 500 a 2000 Hz;

V → Volume da sala (m^3);

S_{total} → Área total das superfícies da sala;

S → Área de pavimento;

$TR_{desejado}$ → Tempo de reverberação desejado, máximo de 0,5 s para o ensino primário e de 0,7 s para o restante ensino;

S_{teto} → Área de teto disponível para aplicar o material absorvente.

As figuras seguintes representam uma resolução gráfica para determinar a área de material absorvente em função do volume da sala ou o coeficiente de absorção sonora em função da área de teto disponível, partindo das equações 8.2 e 8.3, sendo as figuras 8.1 e 8.2 referentes ao primeiro caso para obter-se tempos de reverberação de 0,7 e 0,5 s respetivamente e as figuras 8.3 e 8.4 para o segundo caso para obter-se tempos de reverberação de 0,7 e 0,5 s respetivamente. Os gráficos foram determinados ambos para o pior caso possível, ou seja, para uma sala com altura de 2,7 m e com o comprimento e largura iguais, assim origina menores áreas de paredes que contribuem com o coeficiente de absorção sonora de 0,04.

Para obter-se um tempo de reverberação de 0,3 s, ou seja o valor mais aconselhado para o ensino primário e salas desenvolvidas para indivíduos com problemas auditivos, torna-se impossível garantir tal valor aplicando somente material acústico no teto, sendo necessário colocar também em paredes. Para a realização de tais soluções aconselha-se que tal dimensionamento seja realizado por profissionais acústicos, dado tratar-se de soluções que apresentam maior dificuldade e grandes quantidades de materiais absorventes. No entanto poderá ser determinado pelo método apresentado no capítulo 8.2, embora se conclua rapidamente que grande parte da sala deva ser tratada.

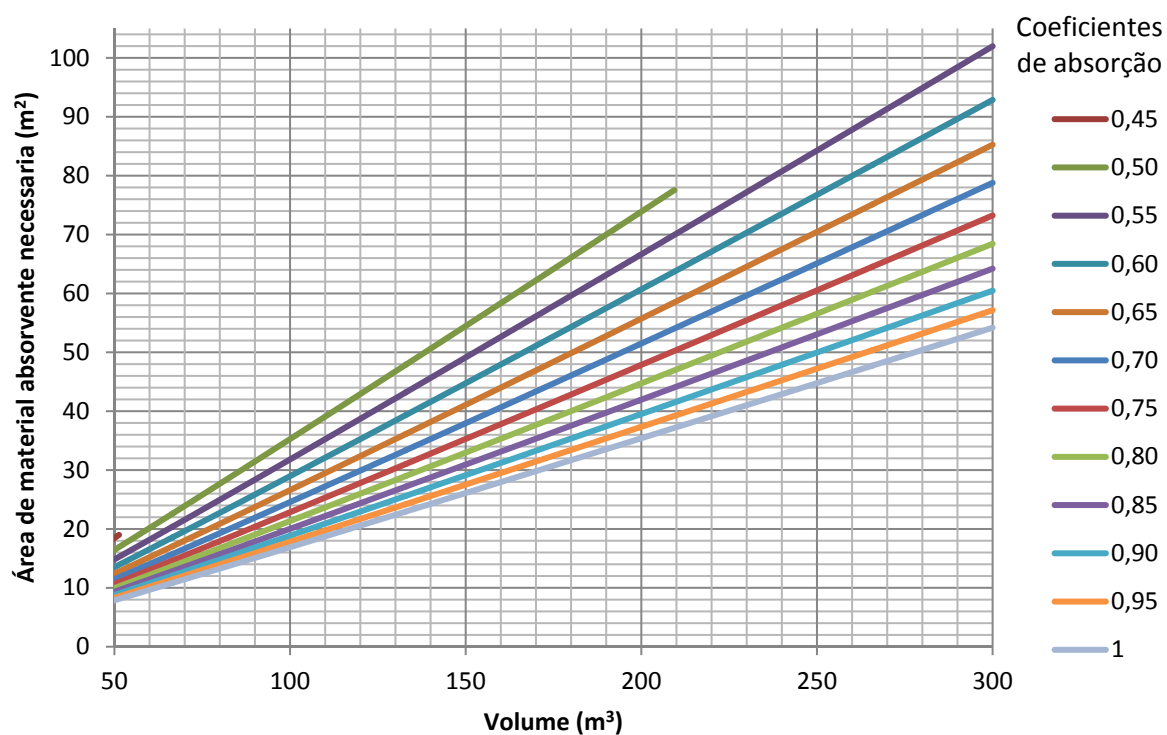


Figura 8.1 – Área de material absorvente mínimo necessário a colocar no teto em função do volume da sala e do coeficiente de absorção do material absorvente para obter TR = 0,7 s.

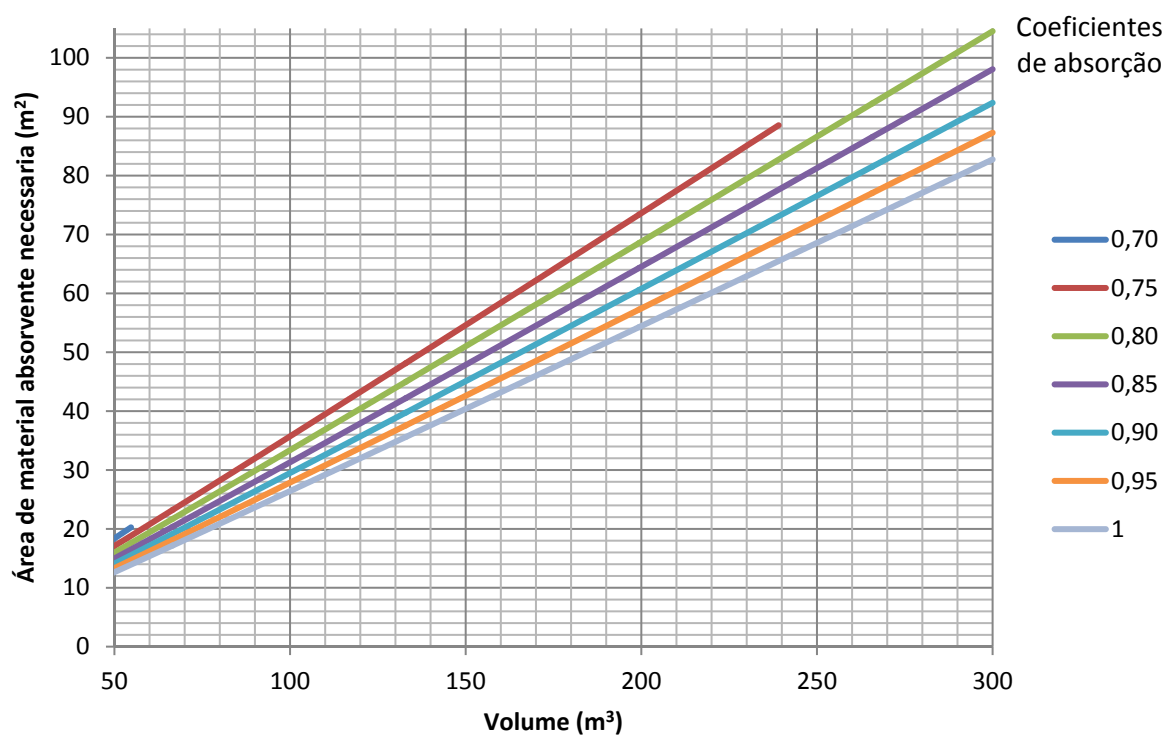


Figura 8.2 – Área de material absorvente mínimo necessário a colocar no teto em função do volume da sala e do coeficiente de absorção do material absorvente para obter TR = 0,5 s.

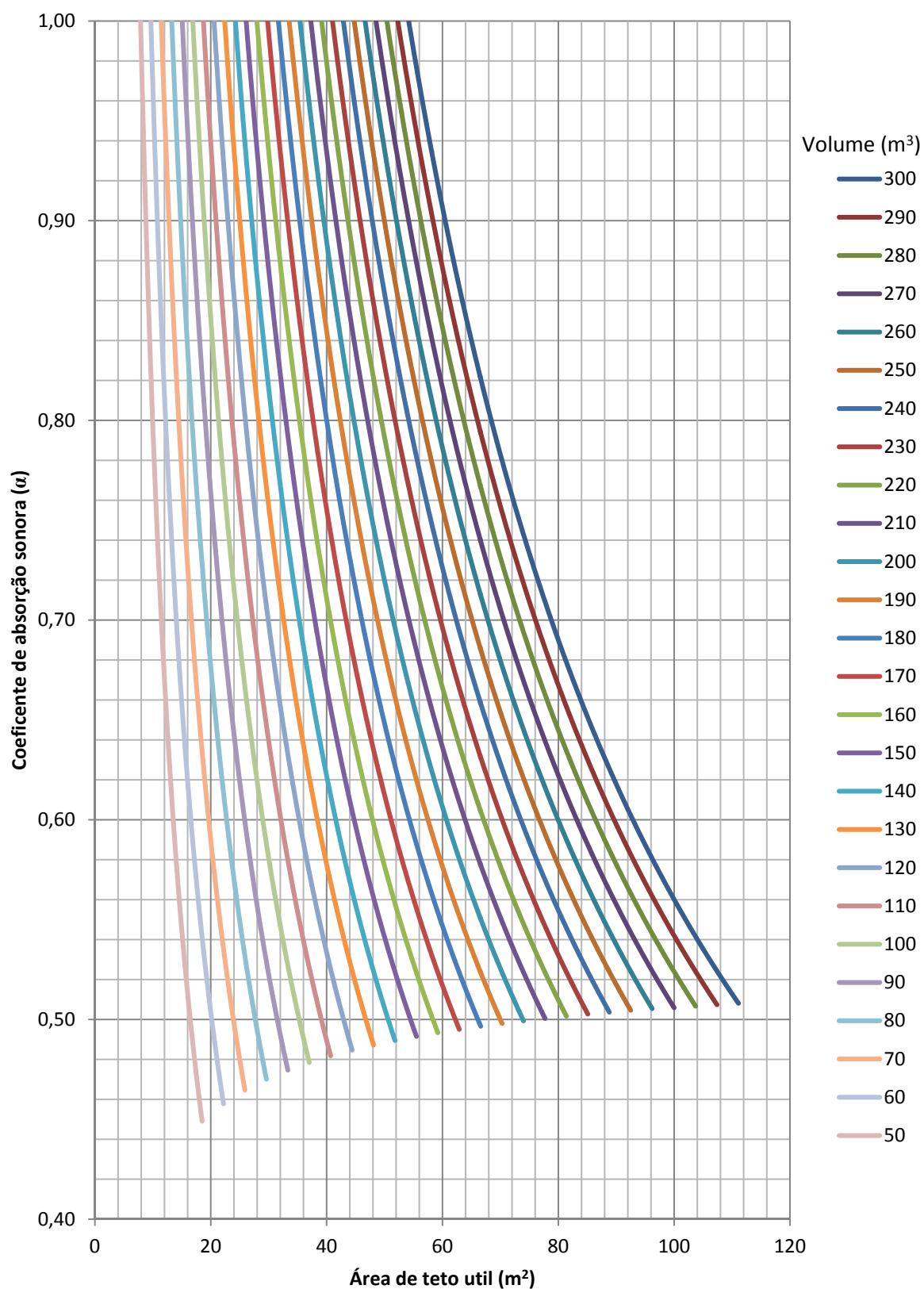


Figura 8.3 – Coeficientes de absorção mínimos a utilizar dependendo da área de material absorvente a aplicar e do volume para obter um TR = 0,7 s.

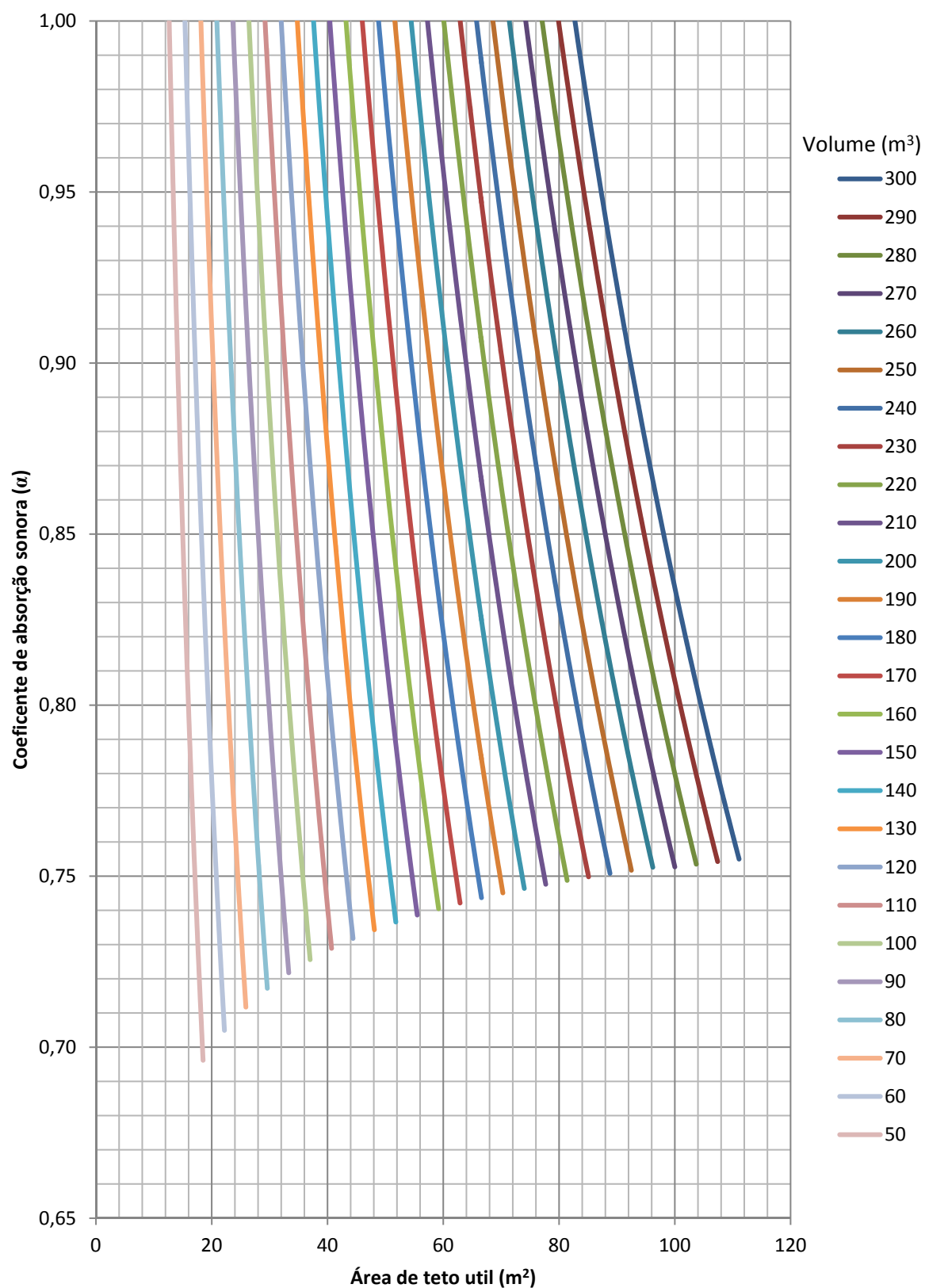


Figura 8.4 – Coeficientes de absorção mínimos a utilizar dependendo da área de material absorvente a aplicar e do volume para obter um TR = 0,5 s.

9

CONCLUSÃO

9.1. CONCLUSÕES GERAIS

Tendo como objetivo estudar o efeito do tempo de reverberação na inteligibilidade da palavra, foi possível concluir-se que salas com tempos de reverberação mais baixos e próximos de zero melhoram a sua inteligibilidade da palavra. Tais valores próximos de zero tornam-se difíceis de atingir e demasiado dispendioso, no entanto conclui-se também que as primeiras reflexões não prejudicam a inteligibilidade, pois o corpo humano é incapaz de as detetar, no entanto estas intensificam o nível sonoro do orador.

Com a análise de vários documentos e legislações é possível aconselhar-se um valor mínimo para o tempo de reverberação de 0,3 s, beneficiando-se assim das primeiras reflexões existentes. O valor máximo aconselhado de tempos de reverberação é diferenciado em função do grau de ensino, sendo de 0,3 ou 0,4 s para o ensino primário e de 0,6 s para o ensino pós-primário. Crianças com maior campo lexical, ou seja, maior escolaridade, podem estar sujeitas a um tempo de reverberação mais elevado já que a sua capacidade de supor está já mais evoluída. No entanto admite-se um incremento até + 0,2 s aos valores aconselhados, isto deve-se ao facto de tempos de reverberação tão baixos poderem provocar sonolência. Deste modo, os valores a utilizar em salas de aula serão no máximo de 0,5 s para o ensino primário e de 0,7 s para os restantes ensinos.

O caso de estudo realizado às salas de aulas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, demonstra que estas apresentam tempos de reverberação demasiadamente elevados. Sendo possível verificar-se para salas sem tratamento acústico um valor máximo de 3,0 s e um valor mínimo de 1,7 s, ou seja muito acima de quaisquer valores ideais. Tais valores quando comparados com a legislação alemã, espanhola, americana, francesa, norueguesa, inglesa, sueca, suíça e inclusive a legislação portuguesa demonstram que tais espaços não respeitam os valores regulamentares, tornando tais salas impossíveis de existir em quaisquer um destes países.

A única sala de aula tratada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto apresenta um tempo de reverberação médio de 0,6 s, sendo um valor idealmente aceitável ($< 0,7$ s) e capaz de respeitar a legislação americana, francesa, norueguesa, portuguesa, inglesa e sueca. A legislação mais exigente é a espanhola que exige um tempo de reverberação inferior a 0,5 s, estando o valor da sala acusticamente tratada bastante próximo de satisfazer tal condição.

Os valores de RASTI (inteligibilidade da palavra) demonstram que o pior valor existente é de 0,41 referente à sala que apresenta o maior tempo de reverberação e o melhor valor de 0,50 referente à sala que apresenta o menor tempo de reverberação, percebendo-se assim que o tempo de reverberação está diretamente ligado com a inteligibilidade. A sala acusticamente tratada apresenta um valor de RASTI

de 0,77, bastante superior a qualquer uma das outras salas, percebendo-se assim que o tratamento acústico beneficia bastante a inteligibilidade.

Por forma a melhorar o tempo de reverberação das salas não acusticamente tratadas existentes na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto são apresentadas propostas de correção acústica das mesmas. Tal correção passa pela aplicação apenas de um material absorvente nos tetos em quantidade suficiente para que o tempo de reverberação médio seja reduzido para 0,7 s, sendo apresentado cinco soluções possíveis com diferentes aspetos finais de acabamento e custos mínimos de 110 mil euros por todas as salas da FEUP sem considerar o custo de mão-de-obra nem o valor do IVA.

As regras de projeto apresentadas consistem na aplicação de um material absorvente nos tetos capaz de reduzir os tempos de reverberação para os valores ideais. São apresentados dois métodos, sendo um deles bastante específico da acústica e mais correto, embora trabalhoso, consistindo no cálculo detalhado do tempo de reverberação de uma determinada sala em função dos vários materiais aplicados na mesma. O método mais simplificado torna-se bastante mais expedito, no entanto originando quantidades possivelmente superiores às necessárias, originando custos acrescidos mas com tempos de reverberação garantidamente aceitáveis.

Para obter-se tempos de reverberação iguais ou inferiores a 0,4 s aconselha-se que tal dimensionamento seja realizado por profissionais acústicos, pois trata-se de soluções que requerem bastante material absorvente, logo estará diretamente associado a custos elevados.

9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Por forma a completar este trabalho poderia:

- Realizar-se uma comparação mais detalhada entre o tempo de reverberação e a inteligibilidade, ou seja para um volume fixo, avaliar a influência da absorção sonora na inteligibilidade da palavra, propondo modelos matemáticos;
- Realização de testes subjetivos com alunos em diferentes tipos de salas.
- Medir-se a inteligibilidade com métodos mais exatos, tais como o STI;
- Utilização de *software* computacional para avaliação 3D da reverberação de uma sala;
- Propor soluções construtivas economicamente mais baratas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, António Pedro Oliveira de, *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Edição 8.3, FEUP, 2012
- [2] *Velocidade do som e velocidade da luz em diferentes materiais*, http://profs.ccems.pt/PaulaFrota/velocidade_luz_som.htm (acedido a 3/3/2013)
- [3] *Ondas sonoras*, <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABqCsAA/ondas-sonoras> (acedido a 3/3/2013)
- [4] *Aulas de física e química – O som e a luz*, http://www aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html (acedido a 4/3/2013)
- [5] *Tabela de níveis sonoros L e pressão sonora correspondente e intensidade sonora*, <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/542-tabela-de-niveis-sonoros-l-e-pressao-sonora-correspondente-e-intensidade-sonora.html> (acedido a 5/3/2013)
- [6] *Discovery of sound in sea*, <http://www.dosits.org/science/advancedtopics/signallevels/> (acedido a 5/3/2013)
- [7] *O Som*, http://www.audireaparelhosauditivos.com.br/o_som.php (acedido a 6/3/2013)
- [8] *Explicatorium – O espectro sonoro*, http://www.explicatorium.com/CFQ8/Som_Espectro_sonoro.php (acedido a 7/3/2013)
- [9] *Perceptual Worlds and Sensory Ecology*, <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/perceptual-worlds-and-sensory-ecology-22141730> (acedido a 7/3/2013)
- [10] *DSSF3 Homepage*, <http://www.ymec.com/products/dssf3e/> (acedido a 7/3/2013)
- [11] Leventhall, Geoff, *What is infrasound?*, Progress in Biophysics and Molecular Biology, Vol. 93, n.º 1–3 (2007), p. 130-137
- [12] *Blog Chr Acustica*, http://chracustica.zip.net/arch2008-08-24_2008-08-30.html (acedido a 8/3/2013)
- [13] EN ISO 11654:1997, *Acoustics-sound absorbers for use in buildings-rating of sound absorption*, 1997
- [14] NP EN ISO 354:2007, *Acústica medição da absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354:2003)*, 2007
- [15] *Novidades POLYREY*, http://www.banema.pt/show_newsletter.php?ID=45&DumpCache=4bd6e6df67fcd (acedido a 8/3/2013)
- [16] *Alpha – Áudio e vídeo*, <http://www.alphaav.com.br/loja/> (acedido a 8/3/2013)
- [17] *Som ao vivo*, <http://www.somaovivo.mus.br/forum/viewtopic.php?t=11411> (acedido 9/3/2013)
- [18] Everest, F. Alton, *Master Handbook of Acoustics*, Fourth Edition, McGraw-Hill Professional, 2001
- [19] Rossing, Thomas D; Fletcher, Neville H, *Principles of vibration and sound*, Springer, 2004
- [20] Cardoso, Luiz, *Fonologia*, <http://www.focadoemvoce.com/gramatica/fonologia.php>. (acedido a 15/3/2013)

- [21] Kuttruff, Heinrich, *Room acoustics*, Fourth Edition, 2000
- [22] Raichel, Daniel R, *The science and applications of acoustics*, Second edition, Springer, 2006
- [23] ANSI - S3.5-1997, *Methods for the calculation of the speech intelligibility index*, American National Standards Institute. (1997)
- [24] IEC 268-16:1988, *Sound system equipment, part 16: the objective rating of speech intelligibility in auditoria by the "RASTI" method*, Geneva, Switzerland, IEC, 1988
- [25] Evans, Gary W.; Lercher, Peter; Meis, Markus; Ising, Hartmut; Kofler, Walter W., *Community noise exposure and stress in children*, The Journal of the Acoustical Society of America, 2001
- [26] Losso, Marco Aurélio Faria, *Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação*, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2003
- [27] Vallet, Michel, *Some European standards on noise in educational buildings*, 2000
- [28] Lukas, Jerome S; Dupree, RB; Swing, JW, *Effects of noise on academic achievement and classroom behavior*, 1981
- [29] *Doenças relacionadas à voz*, <http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/voz2.htm>. (acedido 10/4/2013)
- [30] Guimarães, Isabel, *Os problemas de voz nos professores: prevalência, causas, efeitos e formas de prevenção*, Rev. Portuguesa de Saúde pública, Vol. 22. n.º 2, 2004
- [31] Hodgson, Murray; Nosal, Eva-Marie, *Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 111, 2002
- [32] Bistafa, Sylvio R.; Bradley, John S, *Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 107. n.º 2, 2000
- [33] Seep, Benjamin, *Classroom acoustics: A resource for creating learning environments with desirable listening conditions*, The Society, 2000
- [34] ANSI/ASA S16.90-2010/PART1, *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools*, 2010
- [35] ANSI/ASA S16.90-2009/PART2, *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 2: Relocatable Classroom Factors*, 2009
- [36] *Modular Education Buildings*, <http://www.modtech.com/products/modular-education-buildings.php> (acedido 5/4/2013)
- [37] DIN 18041, *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen* (Qualidade acústica em pequenas e médias salas), 2004
- [38] SIA 181, *Schallschutz im Hochbau* (Isolamento acústico em edifícios), 2006
- [39] Decreto Legislativo Regional n.º 22/83/A, *Poluição sonora*, Diário da Republica, 1983
- [40] DL 251/87, *Regulamento Geral sobre o Ruído*, Diário da Republica, 1987
- [41] DL 09/2007, *Regulamento Geral sobre o Ruído*, Diário da Republica, 2007

- [42] DL 182/2006, *Prescrições mínimas de segurança e saúde em matéria de exposição dos trabalhadores aos riscos devidos ao ruído*, Diário da Republica, 2006
- [43] DL 129/2002, *Aprova o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, Diário da Republica, 2002
- [44] DL 96/2008, *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, Diário da Republica, 1ª Série, 2008
- [45] DB-HR, *Código Técnico de la Edificación – Protección frente al ruido*, Real Decreto, 2007
- [46] *Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements de santé*, 2003, <http://www.legifrance.gouv.fr/initRechTexte.do> (NOR: DEVP0320066A)
- [47] SS 25268, *Byggakustik - Ljudklassning av utrymmen i byggnader – Vårdlokaler, undervisningslokaler, dag- och fritidshem, kontor och hotel* (Acústica – Som classificação de espaços em edifícios - estabelecimentos de saúde, estabelecimentos de ensino e centros de dia, escritórios e hotéis), 2007
- [48] BB 93, *Acoustic Design of Schools: Building Bulletin 93*, 2003
- [49] NS 8175:2012, *Lydforhold i bygninger – Lydklasser for ulike bygningstyper* (Acústica em edifícios - classe de sons para diferentes tipos de construção), 2012
- [50] NS 8175:2008, *Lydforhold i bygninger – Lydklasser for ulike bygningstyper* (Acústica em edifícios - classe de sons para diferentes tipos de construção), 2008
- [51] *Plantas FEUP*, <http://paginas.fe.up.pt/~jupiter/docs/plantas.html> (acedido a 23/04/2013)
- [52] *Catalogo SonaSpray®*, <http://www.stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11846> (acedido a 20/05/2013)
- [53] *Catalogo BASWAphon®*, <http://www.stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11847> (acedido a 20/05/2013)
- [54] *Catalogo Sonacoustic®*, <http://www.stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11910> (acedido a 20/05/2013)
- [55] *Catalogo SonaKrete®*, <http://www.stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11849> (acedido a 20/05/2013)
- [56] Tabelas de coeficientes de absorção dos materiais fornecidos pela empresa S.T.I.E.R. Lda, Pinhal Novo
- [57] *Absorption coefficient chart*, http://www.sae.edu/reference_material/pages/Coefficient%20Chart.htm (acedido a 27/05/2013)
- [58] Escolar, Parque, *Manual de Projecto: Arquitectura*. Lisboa, 2009